

ارزیابی عملکرد لرزه ای ستون های بتنی مسلح با ساختار اصلاح شده توسط افزودنی معدنی و الیاف مجاز تحت اثر رکوردهای زلزله



گرساسب خزانی

استادیار دانشکده هنر و معماری
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب



محمد امامی کورنده

استادیار دانشکده فنی مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب



لیلا حاج نجفی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب



بابک اشتری

دکتری مهندسی زلزله
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

چکیده

وقوع زمین لرزه های متعدد در اقصی نقاط جهان به ویژه در ایران باعث تخریب شهرها و روستاها و مرگ و میر ناشی از آن شده است. ابعاد فاجعه بار فرهنگی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی یک زلزله، هر چند کوتاه، می تواند بر سرنوشت چندین نسل حکومت کند. بنابراین تامین ایمنی ساختمان ها به ویژه ستون ها به عنوان یکی از مهم ترین عناصر باربر سازه ای نقش ویژه و منحصر به فردی در سازه دارد. به گونه ای که در صورت آسیب به ستون، ایمنی و پایداری کل سازه تحت الشعاع قرار می گیرد. در مطالعات اخیر و در این مقاله اثرات برخی از افزودنی های جایگزین سیمان در بتن بررسی شده است که از جمله آنها میکرو سیلیس و الیاف پلی پروپیلن بررسی شده است. خواص بتن جدید بر روی ستون بتن مسلح اعمال شده است و پس از تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی، نتیجه نشان می دهد که میزان برش پایه و جابجایی ستون حاوی مواد افزودنی با افزایش ترکیب این دو ماده در مقایسه با ستون با بتن معمولی افزایش یافته است. همچنین میزان انرژی جذب و مستهلک شده نسبت به ستون با بتن معمولی افزایش چشمگیری داشته است.

کلید واژه: زلزله، عملکرد لرزه ای، الیاف پلی پروپیلن، میکرو سیلیس، ستون بتن مسلح

۱- مقدمه

شناسایی خواص بتن به عنوان یکی از پر مصرف ترین و کاربردی ترین مصالح ساختمانی، همواره مورد توجه محققان و طراحان سازه قرار گرفته است. لذا مقاومت فشاری بتن، به عنوان معیاری مشترک در بین مهندسان، به منظور انتخاب بهینه ترین ساختار بتن مورد توجه است. در حالت کلی ساختار بتن از نسبت های اختلاط متفاوتی

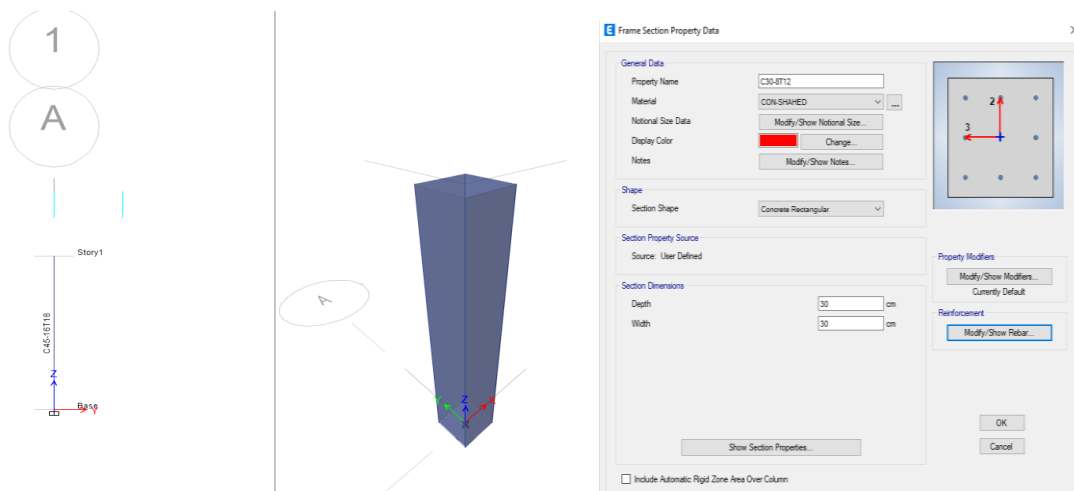
از سیمان، آب و سنگدانه شامل شن و ماسه تشکیل شده است. در حالی که استفاده از مواد افزودنی در بتن می تواند سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در ساختار آن شود. بهفرنیبا و همکاران در سال ۱۳۹۰ در مطالعه ای اثر مواد افزودنی را بر رفتار و مشخصات مکانیکی بتن متخلخل مورد آزمایش و سنجش قرار دادند. در این مطالعه، اثر نسبت های آب به سیمان و همچنین اثر افزودن ماده ی

پوزولانی میکروسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به تنهایی و بطور همزمان ، بر خصوصیت مقاومت فشاری بتن متخلخل طی مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد، ترکیب مواد افزودنی تا مقدار مشخصی موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می شود. ملکی و اسماعیلی در سال ۱۳۹۵ در پژوهشی تاثیر فرآورده های میکروسیلیسی بر خواص بتن سخت شده را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از پودر و ژل میکروسیلیس مقاومت فشاری بتن را به ترتیب برابر ۳۷/۵ و ۵۶٪ افزایش داده است. چو و همکاران ۲۰۱۹ در پژوهشی به مطالعه تجربی ظرفیت لرزه ای ستونهای کامپوزیت بتن مسلح بر اساس کامپوزیت سیمانی با الیاف انعطاف پذیر پلی وینیل الکل پرداختند. الیاف کامپوزیت سیمانی با انعطاف پذیری بالا برای نشان دادن کرنش های کششی با انعطاف پذیری زیاد (بالای ۰.۲٪) و حفظ تنش کششی پس از ایجاد ترک و چندین ریز ترک در حالی که از تمرکز ترک جلوگیری می کند، ساخته شده است. برای بهبود عملکرد لرزه ای یک ستون بتن مسلح، یک جعبه پیش ساخته از جنس الیاف کامپوزیت سیمانی با انعطاف پذیری بالا به صورت موضعی در قسمت بحرانی و در ناحیه مفصل خمیری ستون جایگذاری و در ارزیابی عملکرد لرزه ای ستون ، مجموعه ای از آزمایشهای بار چرخه ای با ساخت چهار نمونه ستون انجام شد . نتایج آزمایشها نشان داد که بتن مسلح حاوی الیاف با انعطاف پذیری بالا و ستون های دارای الیاف کامپوزیت سیمانی با انعطاف پذیری بالا نه تنها عملکرد لرزه ای را بهبود بخشیدند، بلکه ترکهای خمشی و برشی در ناحیه بحرانی ستون را به حداقل رساندند. لازم به ذکر است مواد افزودنی

، به عنوان جایگزین سیمان در بتن به کار می روند. از این رو در پژوهش حاضر تلاش شده درصد ترکیب مناسب میکروسیلیس به میزان ۵٪ وزنی سیمان که از میان سه ترکیب میکروسیلیس ۱ و ۳ و ۵ درصدی ، بیشترین اثر را بر مقاومت فشاری نمونه ها داشته انتخاب و در گام بعد به میزان ۱٪ الیاف از نوع پلی پروپیلن به ترکیب فوق افزوده و مقایسه ای از تأثیر همزمان دو ماده افزودنی میکروسیلیس و الیاف پلی پروپیلن در حالت با ۵٪ میکروسیلیس ، و ترکیبی از ۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱٪ الیاف پلی پروپیلن، با بتن معمولی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش پژوهش

فضای حل مسئله سه بعدی در نظر گرفته شده و شامل یک ستون بتن مسلح به ارتفاع سه متر میباشد که در نرم افزار ETABS مدل شده و یک طرف گیردار است. مقطع ستون بتن مسلح مورد مطالعه در پژوهش حاضر در دو حالت مختلف تنش تسلیم و تنش نهایی آرماتورهای عرضی به ترتیب ۳۴۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال میباشد، همچنین تنش تسلیم و تنش نهایی آرماتورهای طولی به ترتیب برابر با ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی کمتر میلگردهای عرضی نسبت به میلگردهای طولی باعث کاهش بیشتر در مقاومت و موجب شکل پذیری ستون بتن مسلح میشود. مقطع ستون ، مربعی شکل می باشد. طول هر بعد از ستون برابر ۳۰ سانتی متر بوده و این ستون توسط ۸ عدد آرماتور نمره ۱۲ مسلح شده است. در شکل (۱) مقطع ستون مورد مطالعه در این پژوهش نمایش داده شده است.



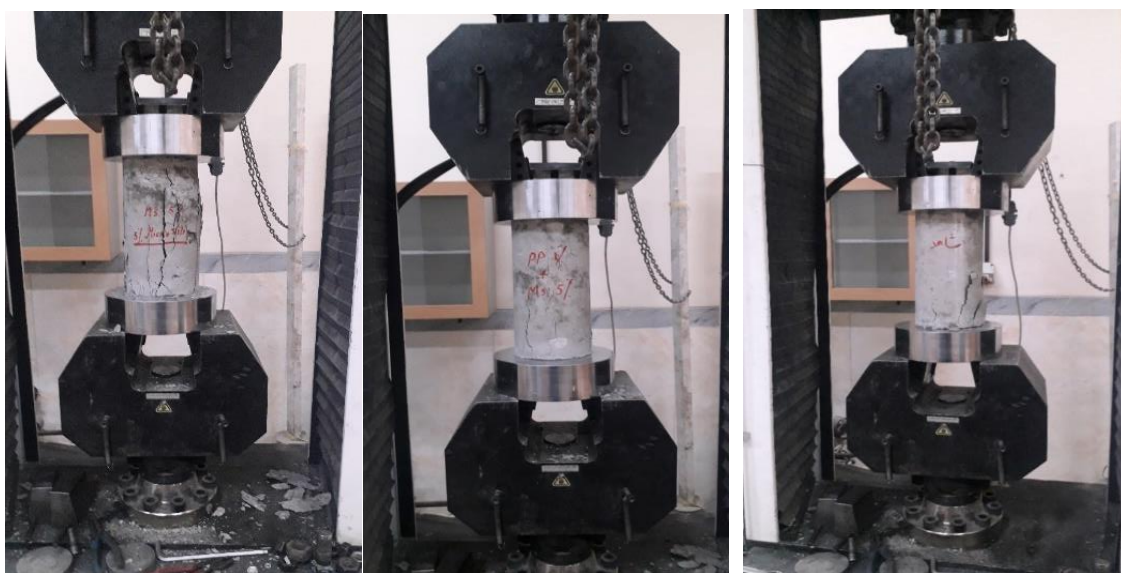
شکل (۱) - تصویر ستون مدل شده در محیط نرم افزار ETABS

حاوی ۰.۵٪ میکروسیلیس، بتن حاوی ترکیبی از ۰.۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱٪ الیاف پلی پروپیلن و بتن معمولی به ترتیب برابر با ۶۲/۸، ۵۹/۵، ۴۸/۸ مگاپاسکال از نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری بدست آمد. سرعت بارگذاری دستگاه ۰/۲۳ مگاپاسکال بر ثانیه می باشد که در تمامی حالات ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نمودار نیرو-جابجایی نمونه های مورد مطالعه بر اساس داده های آزمایشگاهی را نمایش میدهد. خواص مکانیکی بتن های فوق به ترتیب به ۳ ستون با مشخصات فوق اختصاص و تحت اثر رکوردهای زلزله قرار داده شد.

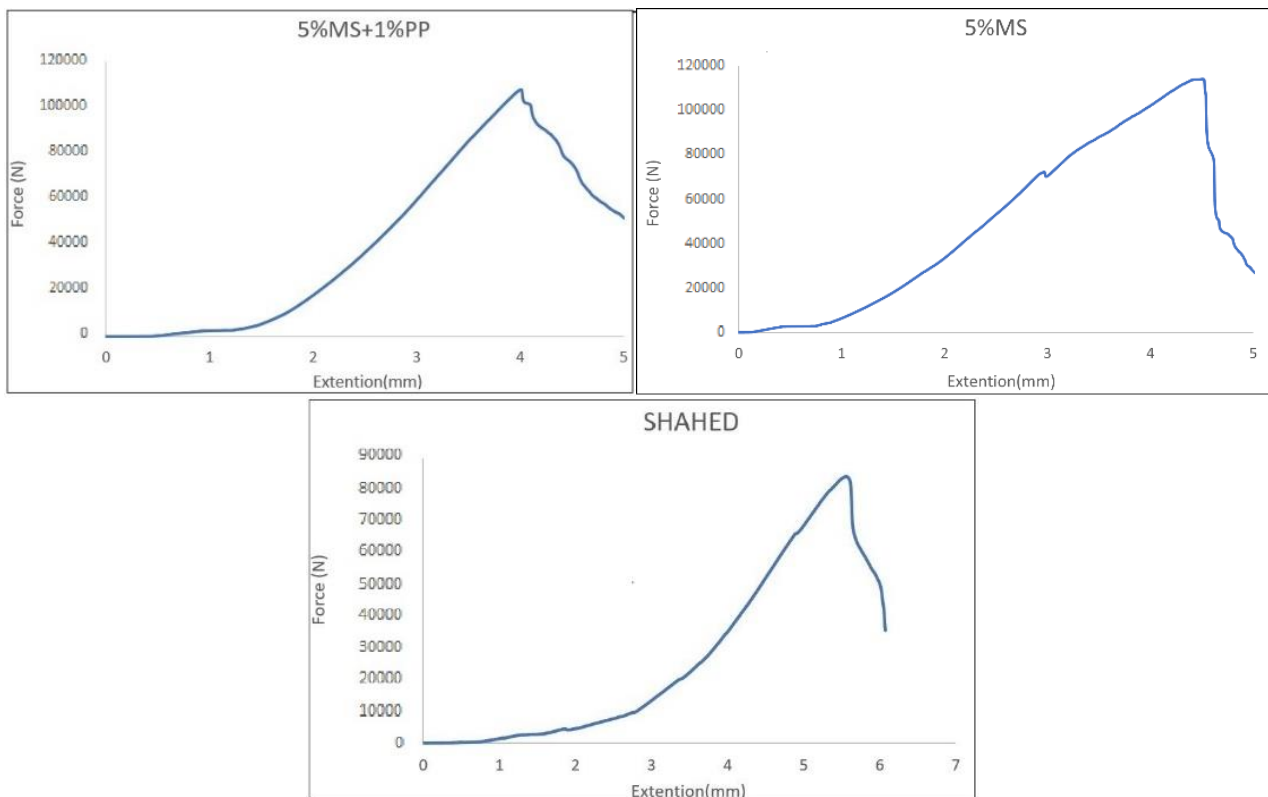
به منظور مقایسه ی عملکرد لرزه ای ستون با بتن معمولی و بتن های حاوی مواد افزودنی، لازم است مشخصات مکانیکی مصالح منتخب در دسترس باشد. بدین منظور نمونه های استوانه ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر از بتن معمولی و بتن حاوی مواد افزودنی بر اساس استاندارد ASTM C39 تهیه شد. جدول (۱) مشخصات الیاف مورد استفاده در این تحقیق را نشان میدهد و در شکل (۲) نحوه استقرار نمونه های مورد مطالعه زیر دستگاه جک فشاری نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، مقاومت فشاری ۲۸ روزه سه نوع بتن مورد آزمایش شامل: بتن

جدول (۱) - مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این مطالعه

مقدار	خصوصیات
۰/۹۱	چگالی (gr/cm^3)
۱۸	طول الیاف (mm)
۱	قطر الیاف (mm)
۱۸	نسبت ابعاد (L/D)
۳۲۰۰۰	ضریب کشسانی (MPa)



شکل (۲) - نمایش استقرار نمونه های منتخب زیر دستگاه جک فشاری



شکل (۳) - نمودار نیرو-جابجایی نمونه های مورد مطالعه بر اساس داده های آزمایشگاهی

۲-۱- روش تحلیل تاریخچه زمانی

تحلیل تاریخچه زمانی روشی تحلیلی است که جهت تعیین پاسخ های یک سازه در هر مقطع زمانی و در مدت وقوع زلزله و هنگامیکه سازه در تراز پایه و تحت تاثیر شتاب های ناشی از حرکت زمین قرار می گیرد، استفاده می شود. در این روش پاسخ های دینامیکی سازه که تابعی از زمان است به وسیله ی انتگرال گیری عددی، معادله ی حرکت سازه را محاسبه و تعیین می نماید. از این روش تحلیل برای حالات خطی الاستیک و غیر خطی انواع سازه می توان استفاده کرد. مقایسه بین نتایج تحلیل الاستیک سازه با استفاده از طیف طرح استاندارد و یا طیف طرح ویژه ساختگاه با آنچه که از تحلیل تاریخچه زمانی خطی به دست می آید الزامی است و از این رو نسبت میرایی در محاسبات برابر با ۰.۵٪ منظور شده است.

۲-۲- معیارهای انتخاب رکورد زلزله

طبق روال بخش های قبل مقاله یکی از فرض های این پژوهش مدلسازی ستون بر روی خاک نوع II می باشد. با توجه به این که در این پژوهش خاک ساختگاه ستون مدلسازی شده خاک نوع II آیین نامه ۲۸۰۰ ایران در نظر گرفته شده است (خاک خیلی متراکم یا سنگ سست

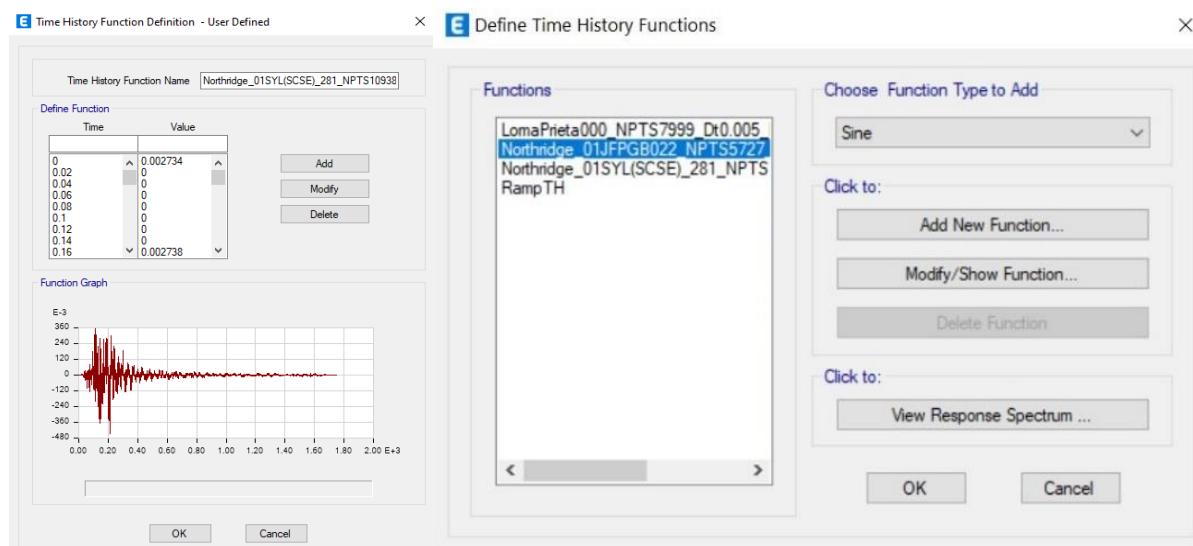
شامل شن و ماسه خیلی متراکم یا رس بسیار سخت با ضخامت بیش از ۳۰ متر، سنگ های آذرین و رسوبی مانند توف، سنگ متورق و کاملاً هوازده)، سعی شد تا نوع خاک ایستگاه های ثبت کننده ی شتاب نگاشت های زلزله منتخب مطابق با نوع خاک فرض شده برای مدل مورد مطالعه باشد. برای این منظور متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری ($V_{S,30}$) از سطح زمین برای هر شتاب نگاشت باید در محدوده ی متوسط سرعت موج برشی خاک نوع II، یعنی باید در محدوده ی متوسط سرعت موج برشی ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه باشد. به منظور انتخاب شتاب نگاشت های زلزله جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر روی ستون مورد مطالعه، پالس های موجود در مولفه های سرعت و جابجایی رکوردهای زلزله به صورت چشمی با یکدیگر مقایسه و رکورد هایی که تعداد پالس بیشتر و قوی تری داشتند انتخاب شد. این نگاشت های زلزله از پایگاه اطلاعات زلزله PEER دریافت شد. بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، در انجام تحلیل غیر خطی تحت اثر رکورد های زلزله، بازتاب نهایی سازه برابر با بیشینه پاسخ سازه در اثر اعمال رکوردهای انتخابی می باشد. مشخصات رکوردهای انتخابی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲) - مشخصات شتاب نگاشت های انتخاب شده جهت تحلیل تاریخچه زمانی

Earthquake	Year	$V_{S,30}(\frac{m}{s})$	Magnitude (Mw)	Station Name	Mechanism
Northridge-01 (JFPG)	1994	525.79	6.29	Jensen Filter Plant Generator Building	Reverse
Northridge-01 (SYL)	1994	370.52	6.69	Sylmar Converter Sta East	Reverse
Loma Prieta	1989	380.89	6.93	Saratoga Aloha Ave	Reverse Oblique

شکل (۴) تصویر بارهای زلزله ناشی از سه رکورد زلزله در محیط نرم افزار ETABS نمایش داده شده است. لذا در ادامه به مقایسه ی عددی پارامترهای مد نظر در خصوص سه مدل ستون ساخته شده با بتن فاقد مواد افزودنی و بتن های حاوی مواد افزودنی پرداخته میشود.

با توجه به استفاده از سه رکورد زلزله به منظور تحلیل مدل، بازتاب نهایی سازه برابر با بیشینه ی پاسخ ناشی از اعمال سه رکورد خواهد بود. لذا در این مطالعه به ارائه ی نتایج به دست آمده از رکورد زلزله Northridge ایستگاه Sylmar به عنوان بیشینه پاسخ پرداخته شده است.



در شکل (۴) - تصویر بارهای سه رکورد زلزله

است. بدین ترتیب مشاهده شده که برش پایه ی ستونهای بتن مسلح حاوی ۰.۵٪ وزنی میکروسیلیس، حاوی ترکیبی از ۰.۵٪ میکروسیلیس به همراه ۰.۱٪ الیاف پلی پروپیلن و معمولی به ترتیب برابر با ۲/۰۱، ۱/۷ و ۰/۸۳۹ تن، میباشد. همچنین بیشینه ی جابجایی ثبت شده در تراز فوقانی ستون سه متری در این حالت تحت اثر اعمال رکوردهای زلزله یاد شده به ترتیب برابر با ۸/۵۲، ۷/۱۷ و ۴/۶۶ میلی متر به دست آمده است که بر خلاف انتظار، افزایش جابجایی به دلیل تغییر محتوای فرکانسی و انطباق محور پرئودیک ستونهای حاوی میکروسیلیس بر نواحی پرده که طیف فوریه رکورد Northridge ایستگاه Sylmar بوده که پدیده تشدید را به همراه داشته است. حداکثر ظرفیت

۳- تحلیل و مقایسه نتایج نرم افزاری

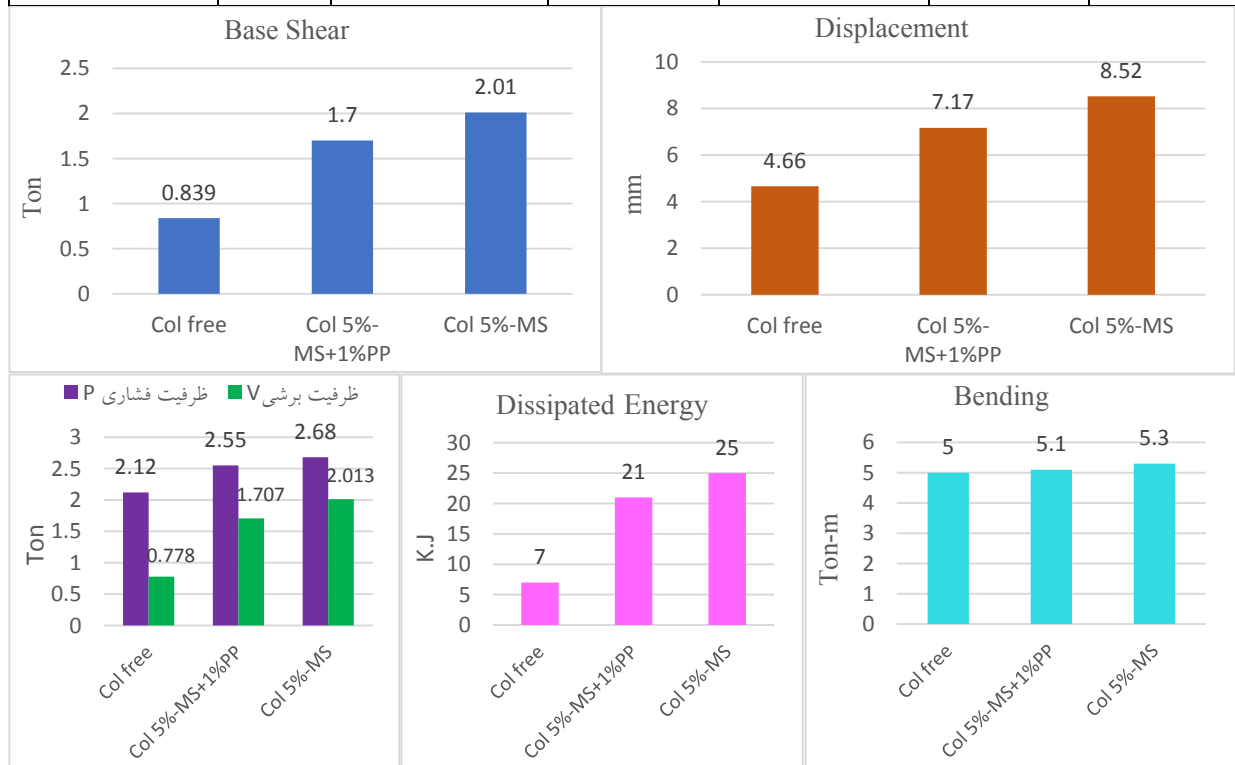
بر اساس نتایج به دست آمده برای ستون بتن مسلح حاوی ۰.۵٪ وزنی میکروسیلیس، ستون بتنی حاوی ترکیبی از ۰.۵٪ میکروسیلیس به همراه ۰.۱٪ الیاف پلی پروپیلن و ستون بتن مسلح معمولی، تحت اثر سه رکورد JFPG، Sylmar، Loma Prieta و مشخص شد بیشینه پاسخ های مورد مطالعه در این پژوهش که شامل: برش پایه، بیشینه ی جابجایی، ظرفیت خمشی، انرژی جذب شده و ظرفیت فشاری و برشی می باشد از رکورد شتاب نگاشت ایستگاه Sylmar بدست آمده است. پرئود مود اصلی ستون به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۰۸۲ و ۰/۱ ثانیه بدست آمده است. جدول (۳) خلاصه ای از نتایج پاسخ ستون ها را نمایش داده

ترتیب برابر با ۲/۶۸، ۲/۵۵ و ۲/۱۲ تن و بیشینه ظرفیت برشی ستون نیز تحت اثر رکورد Sylmar به ترتیب برابر با ۲/۰۱۳، ۱/۷۰۷ و ۰/۷۷۸ تن به دست آمده است. شکل (۵) نمودار بیشینه پاسخ ستون ها در اثر اعمال زلزله Northridge ایستگاه Sylmar نمایش داده شده است.

خمشی مقطع به ترتیب برابر با ۵/۳، ۵/۱ و ۵ تن-متر از نتایج خروجی نرم افزار حاصل شده است. انرژی مستهلک شده به ازای سه رکورد، مورد مطالعه قرار گرفت که از میان رکوردها، بیش ترین انرژی مستهلک شده در ستون به ازای رکورد Sylmar به ترتیب برابر با ۲۵، ۲۱ و ۷ کیلوژول حاصل شده است. حداکثر ظرفیت فشاری مقطع مد نظر به

جدول (۳) - خلاصه نتایج به دست آمده مربوط به ستونهای ساخته شده تحت اثر رکورد زلزله Northridge ایستگاه Sylmar

نمونه های مورد مطالعه	برش پایه (تن)	بیشینه جابجایی (میلی متر)	ظرفیت خمشی (تن-متر)	انرژی مستهلک شده (کیلوژول)	ظرفیت فشاری (تن)	ظرفیت برشی (تن)
۵٪ میکروسیلیس	۲/۰۱	۸/۵۲	۵/۳	۲۵	۲/۶۸	۲/۰۱۳
۵٪ میکروسیلیس همراه ۱٪ الیاف پلی پروپیلن	۱/۷	۷/۱۷	۵/۱	۲۱	۲/۵۵	۱/۷۰۷
بتن معمولی	۰/۸۳۹	۴/۶۶	۵	۷	۲/۱۲	۰/۷۷۸



شکل (۵) - نمودار نتایج مربوط به ستونهای ساخته شده تحت اثر رکورد زلزله Northridge ایستگاه Sylmar

۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این مطالعه به شرح زیر قابل بیان هستند:

۱- مقاومت فشاری نمونه ی شاهد بتن معمولی برابر با ۴۸/۸ مگاپاسکال حاصل شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد افزودن ۰/۵ میکروسیلیس موجب افزایش ۲۳ درصدی مقاومت فشاری نمونه ی شاهد شده است.

افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش ۳/۳ درصدی مقاومت فشاری نمونه شده است. به عبارتی افزودن الیاف پلی پروپیلن، به تنهایی موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه بتن شده است. در حالی که افزودن میکروسیلیس موجب بهبود پارامتر مقاومت فشاری نمونه بتن شده است.

۲- افزودن ۰/۵ وزنی میکروسیلیس تا ۵۸/۳ درصد موجب افزایش برش پایه ثبت شده در ستون بتن مسلح می شود. افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش ۷/۴ درصدی برش پایه ثبت شده در ستون بتن مسلح می شود.

۳- افزودن ۰/۵ وزنی میکروسیلیس تا ۴۵/۳ درصد موجب افزایش جابجایی در ستون بتن مسلح می شود. افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش ۷/۴ درصدی جابجایی ثبت شده در ستون بتن مسلح شده است.

۴- ظرفیت خمشی نمونه بتن حاوی ۰/۵ وزنی میکروسیلیس نسبت به نمونه بتن شاهد، ۵/۶ درصد افزایش را نشان داده است. افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش ۳/۶ درصدی ظرفیت خمشی ستون بتنی خواهد شد.

۵- نتایج نشان می دهد، با افزودن ۰/۵ وزنی میکروسیلیس، انرژی مستهلک شده در ستون افزایش چشمگیری یافته

است. نتایج این تحقیق نشان داده با افزودن ۰/۵ وزنی میکروسیلیس، شاهد بهبود ۷۲ درصدی پارامتر استهلاک انرژی در ستون خواهیم بود. همچنین افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش ۵/۳ درصدی پارامتر استهلاک انرژی ثبت شده در ستون بتنی شده است.

۶- ظرفیت فشاری و برشی نمونه بتن حاوی ۰/۵ وزنی میکروسیلیس نسبت به نمونه بتن شاهد معمولی به ترتیب ۲۰/۸ و ۶۱/۳ درصد افزایش یافته است. با افزودن ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به بتن حاوی ۰/۵ میکروسیلیس موجب کاهش به ترتیب ۳/۹ و ۶/۸ درصدی پارامتر ظرفیت فشاری و برشی ثبت شده در ستون بتن مسلح خواهد شد.

۷- با توجه به این که پرپودر مود اصلی ستون بتنی حاوی ۰/۵ وزنی میکروسیلیس و ستون بتنی حاوی ترکیبی از ۰/۵ میکروسیلیس به همراه ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن به ترتیب برابر با ۰/۰۸۱ و ۰/۰۸۳ ثابته حاصل شده است، لذا پرپودر مود اصلی سازه در این حالت منطبق بر نواحی پرماده ی طیف فوریه ی رکورد Sylmar می باشد. تغییر محتوای فرکانسی دو مدل، موجب وقوع تشدید در مدل ستون اصلاح شده با ۰/۵ وزنی میکروسیلیس و ستون اصلاح شده با ترکیبی از ۰/۵ وزنی میکروسیلیس به همراه ۰/۱ الیاف پلی پروپیلن، شده است. بنابراین دو پاسخ برش پایه و جابجایی ثبت شده در هر دو مدل ستون، بیش تر از مدل ستون شاهد می باشد.

۸- به منظور انجام مطالعات آتی، موضوعات زیر قابل پیشنهاد است:

۸-۱- ارزیابی رفتار لرزه ای اجزای باربر بتن مسلح اصلاح شده با مواد افزودنی سنتی نظیر انواع پوزولان ها تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک زلزله.

- ۸-۲- ارزیابی رفتار لرزه ای اجزای باربر بتن مسلح اصلاح شده با مواد افزودنی مدرن نظیر انواع ژئوپلیمرها تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک زلزله.
- ۸-۳- ارزیابی رفتار لرزه ای اجزای باربر بتن مسلح اصلاح شده با مواد افزودنی سنتی نظیر انواع پوزولان ها تحت اثر رکوردهای حوزه دور زلزله.
- ۸-۴- ارزیابی رفتار لرزه ای اجزای باربر بتن مسلح اصلاح شده با مواد افزودنی مدرن نظیر انواع ژئوپلیمرها تحت اثر رکوردهای حوزه دور زلزله.
- ۸-۵- مقایسه ی عملکرد لرزه ای اجزای باربر بتن مسلح اصلاح شده با مواد افزودنی مدرن و سنتی تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور زلزله.

۵- تقدیر و تشکر

مراتب سپاس و قدردانی خویش را به محضر اساتید گرانمایه جناب آقایان دکتر امامی کورنده، دکتر خزانگی، دکتر مسعودی و دکتر اسفندی سرافراز که در انجام این پژوهش مورد عنایت و راهنمایی خویش قرار داده اند، صمیمانه تقدیم می‌نمایم.

۶- مراجع

- [۱] بهفرنیا کیاچهر، ابطحی سید مهدی و حجازی سید احمدرضا. سال ۱۳۹۰، بررسی آزمایشگاهی بتن متخلخل و اثر افزودنی ها بر مشخصات مکانیکی آن. ششمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- [۲] اکبری محمود، خادمی فائزه السادات، خادمی سید سروش. سال ۱۳۹۳، بررسی تاثیر میزان ماده ی پوزولانی میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل.
- [۳] ملکی احمد و اسماعیلی فردین. سال ۱۳۹۵، مطالعه ی آزمایشگاهی تاثیر فرآورده های میکروسیلیس بر روی خواص بتن سخت شده. فصلنامه آنالیز سازه- زلزله، دوره ۱۳، شماره ۱.
- [۴] محمدی یعقوب و سیف الهی فرید. سال ۱۳۹۶، بررسی تاثیر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره هفدهم، شماره ۴.
- [5] Cho, C. G., Cheong, S. H., Moon, H. J., Kim, H. Y., Lee, K. S., (2019) *Experimental Study on Seismic Capacity of Reinforced Concrete Composite Columns Based on a High-ductile Fiber Cementitious Composite. (IJCSM) International Journal of Concrete Structures and Materials, 1-10 .*
- [6] *Standard No. 2800 (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of building, 4th Edition, Tehran, Iran.*

ارزیابی روش آزمون تعیین عمق نفوذ آب در بتن به عنوان سنجای برای نفوذپذیری بتن



بابک احمدی
عضو هیات علمی بخش فناوری بتن
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



مهدی نعمتی چاری
عضو هیات علمی بخش فناوری بتن
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

چکیده

نفوذپذیری بتن در برابر آب و رطوبت به عنوان پارامتری برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی شناخته شده است. از اینرو آزمایش‌های متعددی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در قالب آزمون‌های استاندارد معرفی شده‌اند. آزمایش عمق نفوذ آب در بتن تحت فشار طبق استاندارد *EN 12390-8* یکی از روش‌های ارزیابی نفوذپذیری/نفوذناپذیری بتن در شرایط وجود فشار هیدرواستاتیک آب است. تاکنون آزمون جدیدی که بهتر از این روش بتواند نفوذپذیری بتن در برابر فشار هیدرواستاتیک را ارزیابی نماید ارائه نشده است و در نتیجه این آزمون در سطح وسیعی مورد استفاده مهندسان و محققان قرار می‌گیرد. در این مطالعه سعی شده است تا با ارزیابی نتایج نفوذپذیری بتن‌های مختلف، نشان داده شود که عمق نفوذ آب لزوماً از نسبت آب به سیمان، عیار مواد سیمانی و یا حجم خمیر سیمان پیروی نمی‌کند. با ارزیابی نتایج، نشان داده شده است که عمق نفوذ آب برای یک طرح مخلوط بتن می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی را نشان دهد. همچنین تغییرات عمق نفوذ آب با تغییر نسبت آب به سیمان بتن در یک محدوده وسیع، هم‌راستا نیست. بنابراین لازم است تا ویرایش اصلاح‌شده‌ای از این آزمون ارائه گردد تا نمود بهتری از مشخصات نفوذپذیری/نفوذناپذیری بتن را به دست دهد.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، عمق نفوذ، فشار هیدرواستاتیک، آب‌بندی، *EN 12390-8*

۱- مقدمه

آنالیز کمی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده مانند مقاومت فشاری، یک روش سنتی طراحی و ساخت سازه‌های بتنی بوده است. هرچند طراحی کمی برای دوام^۱،

به دلیل اندرکنش پیچیده وابسته به زمان که بین محیط اطراف بتن و طول عمر آن وجود دارد، در حال تغییر تدریجی و رشد می‌باشد [۱]، ولی به‌رحال طراحی سازه‌های بتنی، اساساً بطور توأم در بردارنده ارزیابی مقاومت، پایداری و دوام است [۲]. همچنین باید گفت که دوام، یک پارامتر عملکردی در مشخصات مربوط به سطح کارایی بتن برای

¹ Durability

سازه‌های بتنی است. از طرفی مفهوم بتن با عملکرد مناسب (توانمند)^۲ مطمئناً در طول زمان استنتاج می‌شود. در حقیقت بتن توانمند، بتنی است که با مصالح مناسب ساخته شده، مطابق طرح اختلاط انتخاب شده ترکیب می‌گردد، بطور مناسب مخلوط، حمل، ریخته، متراکم و عمل‌آوری می‌شود تا بتواند در مقابل بارهای محیطی و بارهای سازه‌ای طراحی شده، مقاومت کند. بنابراین، بتن توانمند بطور مستقیم به بتن‌های با دوام مرتبط است [۳]. لازم به ذکر است که معیارهای دوام برای هر بتنی با توجه به عملکرد آن تعریف می‌شود. به عنوان مثال، خواص دوام یک مخزن آب بتنی شامل خیلی از جنبه‌ها به ویژه نفوذپذیری^۳ می‌باشد [۴]. ویژگی نفوذپذیری، خاصیت بنیادی بتن است که روی آغاز و وسعت آسیب‌دیدگی بتن اثر می‌گذارند و می‌توانند پایه‌ای برای پیش‌بینی آسیب‌دیدگی را تشکیل دهند [۱]. بنابراین بتن توانمند ممکن است به عنوان بتنی تعریف شود که مقاومت بالا در برابر نفوذ مایع داشته باشد در عین اینکه الزامات مقاومتی را نیز برآورده می‌نماید [۳].

راه‌های متعددی برای اندازه‌گیری دوام بتن وجود دارد. مقاومت در برابر نفوذ کلراید و آب و هوا، بعضی از ساده‌ترین روش‌های ارزیابی برای تعیین دوام بتن هستند. نفوذپذیری آب، کلراید و سایر یون‌های مهاجم در بتن عمده‌تاً حاکم بر فرایندهای شیمیایی و فیزیکی تخریب در بتن هستند [۵]. ورود یون‌های مهاجم به فرایندهای مختلف انتقال رطوبت بستگی دارد، یعنی انتشار^۴ جذب آب^۵ و نفوذپذیری^۶. بنابراین ویژگی‌های نفوذپذیری، نماینده کلیه

مکانیسم‌های انتقال می‌باشد [۱]. به همین دلیل، مقاومت در برابر نفوذ مایعات، اکثراً و بطور عادی برای شناسایی دوام بتن بکار می‌رود [۶]. بنابراین می‌توان گفت، زمانیکه نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد، دوام آن افزایش پیدا می‌کند [۷ و ۸]. از اینروست که می‌توان اظهار داشت که نفوذناپذیری بتن باید خط مقدم دفاع در مقابل هرگونه فرایند آسیب‌دیدگی فیزیکی- شیمیایی بتن باشد. نفوذپذیری که مهمترین مشخصه برای دوام بتن است به مشخصات ریزساختار مانند اندازه، توزیع و ارتباط داخلی منافذ و ریزترک‌ها بستگی دارد.

آزمون‌های جذب آب به عنوان دسته اول از آزمون‌ها، ساده‌ترین و کارآمدترین ابزار برای ارزیابی قابلیت ورود آب به بتن است [۹-۱۰]، و به این ترتیب، پرکاربردترین دسته از تکنیک‌های ارزیابی به شمار می‌رود. مکانیسم کلی روش‌های آزمون جذب آب، جریان غیراشباع ناشی از نیروهای موئینه است. نه استاندارد با روش‌های اندازه‌گیری و شرایط متفاوت در ادبیات فنی برای نشان دادن قابلیت نم‌بندی^۷ بتن و همچنین ارزیابی عملکرد کاهنده‌های نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفت. روش‌های استاندارد زیر برای ارزیابی قابلیت ورود آب در بتن تحت مکش مؤئینه گزارش شده است:

- *ASTM C1585*: روش آزمون استاندارد برای اندازه‌گیری میزان جذب آب توسط بتن‌های حاوی سیمان هیدرولیکی [۱۱]

- *BS 1881-208*: توصیه‌هایی برای تعیین میزان جذب آب سطحی اولیه بتن [۲]

- *BS 1881-122*: روش تعیین میزان جذب آب [۱۳]

² *High Performance Concrete (HPC)*

³ *Permeability*

⁴ *diffusion*

⁵ *water absorption*

⁶ *permeability*

⁷ *damp-proofing*

- BS 1881-5: روش‌های آزمون بتن سخت‌شده برای مواردی غیر از مقاومت [۱۴]

- EN 1015-18: تعیین ضریب جذب آب ناشی از مکش مویینه ملات سخت‌شده [۱۵]

- UNE 83982: تعیین مکش مویینه در بتن سخت‌شده [۱۶]

- UNI 10859: تعیین میزان جذب آب توسط منافذ مویینه [۱۷]

- ASTM C642: روش آزمون استاندارد برای تعیین چگالی، جذب آب و فضاهای خالی در بتن سخت‌شده [۱۸]

- ABNT NBR 9778: تعیین میزان جذب آب، شاخص فضاهای خالی و جرم ویژه [۱۹]

برای دستیابی به شرایط اولیه، معمولاً آزمون‌ها طبق یک روش خشک‌کردن، آماده می‌شوند، سپس آزمون‌ها در تماس با آب قرار می‌گیرند و در فواصل زمانی معین برای تعیین افزایش جرم ناشی از جذب آب، وزن می‌شوند. در حالیکه اندازه‌گیری تغییر جرم برای اکثر روش‌های آزمون مشابه است، شرایط آماده‌سازی آزمون‌ها بسیار متفاوت می‌باشد که می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر نتایج آزمایش بگذارد.

دومین روش پرکاربرد در موضوع قابلیت ورود آب در بتن به ویژه برای ارزیابی آب‌بندی^۸ بتن، نفوذپذیری آب است. در مورد روش استاندارد یا آزمونی که برای اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در بتن استفاده می‌شود، اتفاق نظر وجود ندارد و آماده‌سازی آزمون نقش زیادی در مقدار نفوذپذیری اندازه‌گیری شده ایفا می‌کند. اندازه‌گیری‌های نفوذپذیری آب در بتن می‌تواند تنوع بالایی داشته باشد، در نتیجه باید مراقب شرایط آماده‌سازی آزمون و اندازه‌گیری جریان/نفوذ برای به دست آوردن نتایج دقیق بود [۲۰-۲۲]. برخی از آزمایش‌ها قادر به اندازه‌گیری جریان آب زیر آستانه

نفوذپذیری آب نیستند. برای این آزمایش‌ها، آزمون‌هایی که جریان آب را نشان نمی‌دهند، لزوماً به معنای غیرقابل نفوذ بودن بتن نیستند، فقط آن روش آزمون قادر به اندازه‌گیری جریان نیست. بنابراین در تفسیر نتایج نفوذپذیری آب لازم است احتیاط شود. بطور کلی دو دسته اصلی از آزمون‌های نفوذپذیری آب مورد استفاده قرار گرفته است. دسته اول روش‌هایی است که عمق نفوذ آب را در یک بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌کنند. دسته دوم، آزمون‌های جریان آب است که سرعت جریان را تا رسیدن به حالت پایدار اندازه‌گیری می‌کنند. برای هر دو دسته، یک گرادیان آب تحت فشار در یک جهت روی یک سطح از آزمون اعمال می‌شود. در مجموع، شش روش آزمون استاندارد شده برای نفوذپذیری آب گزارش شده است.

اگرچه آزمون نفوذپذیری آب، یک اندازه‌گیری مستقیم نیست، اما عمق نفوذ نشانه خوبی از نفوذپذیری آزمون است. روش‌های آزمون عمق نفوذ، آزمایش‌های نسبتاً کوتاه‌مدتی هستند که فشار آب را به مدت ۳ تا ۴ روز قبل از نصف‌کردن آزمون و اندازه‌گیری عمق نفوذ، بر روی آزمون‌ها اعمال می‌کنند. گرادیان فشار اعمال شده برای این روش‌ها از ۶۵ تا ۸۰ psi متغیر است، اما معمولاً به عنوان میانگین ۷۲/۵ psi گزارش می‌شود. روش‌های آزمون استاندارد مورد استفاده در این دسته عبارتند از:

- EN 12390-8: عمق نفوذ آب تحت فشار [۲۳]

- DIN 1048-5: آزمایش بتن سخت‌شده [۲۴]

- ABNT NBR 10787: تعیین نفوذ آب تحت فشار [۲۵]

- NCH 2262: تعیین نفوذناپذیری آب - روش نفوذ آب تحت فشار [۲۶]

از طرفی دو روش آزمون با استفاده از برقراری جریان نفوذپذیری آب به عنوان دسته دوم آزمون‌ها در زیر فهرست شده‌اند:

⁸ Water-proofing

CRD-C48-92: روش آزمون استاندارد برای نفوذپذیری آب بتن [۲۷]

- تست نفوذپذیری آب طبق ACCI [۲۸]

رایدینگ^۹ و همکارانش در ارزیابی روش‌های آزمون مختلف، اظهار داشتند که روش EN 12390-8 بهترین روش برای ارزیابی آب‌بندی در بتن (تحت فشار آب) است که به میزان وسیعی نیز مورد استفاده محققان قرار گرفته است [۲۹]. همچنین نتایج این روش آزمون به عنوان یک معیار از دوام در اکثر مشخصات فنی داخلی مانند آیین‌نامه بتن ایران [۳۰]، مبحث نهم مقررات ملی ایران [۳۱]، آیین‌نامه ملی پایایی بتن [۳۲]، مشخصات حفاظ‌های بتنی راه [۳۳]، مشخصات افزودنی‌های نم‌بند و آب‌بند [۳۴] و مشخصات فنی دوغاب آماده دوده سیلیس [۳۵] مورد استناد قرار گرفته است.

از این رو با توجه به میزان کاربرد زیاد روش آزمون تعیین عمق نفوذ آب در بتن تحت فشار، در این تحقیق سعی شده است تا با ساخت سه دسته مخلوط بتن و تعیین میزان عمق نفوذ آب در آنها طبق استاندارد EN 12390-8، قابلیت اعتماد به این روش به عنوان یک سنجه برای نفوذپذیری، ارزیابی گردد.

۲- مکانیسم انتقال رطوبت و معرفی آزمون عمق نفوذ آب

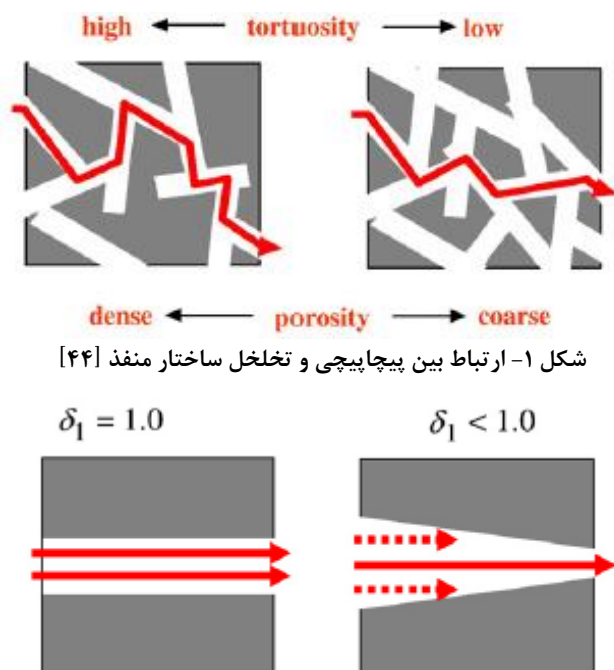
۲-۱- مکانیسم ورود رطوبت در بتن

بطور کلی، بتن یک جسم متخلخل است و رطوبت می‌تواند از میان منافذ آن و بر اساس مکانیسم‌های مختلف وارد بتن شود. به خاطر محدوده وسیع تغییرات اندازه منافذ خمیر سیمان و تغییرات ریزساختار (منجمله پیچاپچی و فشردگی (شکل‌های ۱ و ۲)) با سن بتن، انتقال رطوبت در بتن نسبت به سایر مصالح، پیچیده‌تر است [۳۴ و ۳۷].

بنابراین به دلیل این پیچیدگی در ریزساختار، پیش‌بینی توزیع رطوبت در بتن تاکنون مورد بحث است [۳۸].

این مکانیسم‌ها عبارتند از: مکش موئینه، انتشار و نفوذپذیری در اثر گرادیان فشار [۳۹]. هرچند مطالعات انجام شده روی نفوذ آب و انتقال ایجاد شده در اثر فشار آب در بتن هنوز بصورت کامل در نیامده است. نفوذ در حقیقت، انتقال آب جاری از میان بتن در اثر اختلاف فشار است [۴۰].

در طرف دیگر، جذب آب (موئینه) در نتیجه انتقال رطوبت در منافذ بتن ناشی از کشش سطحی بین آب و ساختار متخلخل بتن می‌باشد [۴۱ و ۴۲]. آب ابتدا روی سطح منافذ موئینه جذب می‌شود و سپس زمانیکه رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، آب تقطیر شده و منافذ را پر می‌کند و شروع به حرکت از منافذ کوچکتر به منافذ بزرگتر می‌نماید [۴۳].



شکل ۱- ارتباط بین پیچاپچی و تخلخل ساختار منفذ [۴۴]

$$\delta_1 = 1.0$$

$$\delta_1 < 1.0$$

شکل ۲- ارتباط بین فشردگی و تخلخل ساختار منفذ [۴۵]

⁹ Riding

در این روش توصیه شده است که ترجیحاً سایر وجوه آزمایش در دستگاه قابل مشاهده باشند. همچنین الزام شده است که ابعاد محیط آزمایش باید بطور تقریبی نصف یک لبه آزمونه مکعبی و یا نصف قطر آزمونه استوانه‌ای باشد.

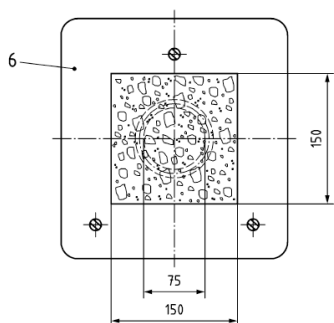


شکل ۳- دستگاه تعیین عمق نفوذ آب در بتن تحت فشار آب

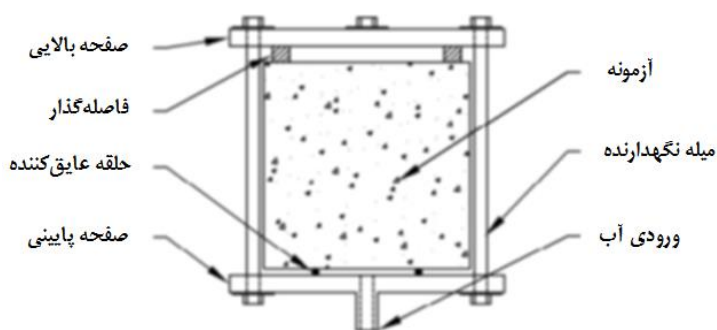
در روش‌های آزمون مانند روش EN 12390-8 سعی شده است تا مؤلفه‌ای از نفوذپذیری اندازه‌گیری شود که صرفاً بیانگر مشخصات انتقال تحت گرادیان فشار است، لکن اگر منافذ بتن قبل از شروع آزمایش، درصد رطوبت کمتر از حالت اشباع داشته باشند، مکش مویینه نیز در اندازه‌گیری‌ها وارد می‌شود. هرچند در صورت اشباع بودن اولیه منافذ بتن، این قابلیت وجود دارد که بخشی از رطوبت منافذ به دلیل پدیده انتشار از داخل آزمونه بتنی به سمت محیط آزمایشگاه خارج شود.

۲-۲- خلاصه روش آزمون EN 12390-8

استاندارد EN 12390-8، روشی برای تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن سخت‌شده‌ای که در آب عمل‌آوری شده، می‌باشد. در این روش آب تحت فشار روی سطح آزمونه بتن سخت‌شده اعمال می‌شود و سپس آزمونه بتن نصف شده و عمق نفوذ آب پیش‌رفته درون بتن، اندازه‌گیری می‌شود. همچنین آزمونه باید مکعبی، استوانه‌ای و یا منشوری بوده که طول لبه یا قطر آن کمتر از 150 mm نباشد. برای اعمال فشار از دستگاهی مانند آنچه در شکل ۳ آمده و طبق مشخصات شکل ۴ چیدمان شده است، استفاده می‌شود.



ب) نمای از بالای سلول آزمایش



الف) نمای روبروی سلول آزمایش

شکل ۴- چیدمان دستگاه تعیین عمق نفوذ آب در بتن [۲۳]

۲-۳- نواقص اولیه روش آزمون

همانطور که در ادبیات فنی بیان شده است، یکی از مواردی که روی نتایج آزمون نفوذپذیری اثر می‌گذارد، شرایط آماده‌سازی آزمون‌ها است. لکن در این استاندارد تنها موردی که برای آماده‌سازی بیان شده است، برس‌زدن سطحی از آزمون پس از قالب‌برداری است که قرار است در طی آزمایش، تحت فشار آب قرار گیرد. در این استاندارد هیچ الزامی در خصوص شرایط رطوبتی آزمون قبل از آزمایش بیان نشده است. واضح است هرچقدر رطوبت نسبی منافذ بتن کمتر باشد، پیشانی تر شوندگی بیشتری نیز در آزمایش قابل مشاهده و اندازه‌گیری خواهد بود. البته در اکثر مشخصات فنی به ویژه مشخصات فنی ارائه شده در داخل کشور [۳۰-۳۵]، بیان شده است که آزمون‌ها باید قبلاً از آزمایش به صورت اشباع با سطح خشک باشند.

یکی دیگر از نواقص این روش آزمون، تعداد آزمون‌های مورد نیاز برای بیان نفوذپذیری یک نمونه است. هرچند به صورت سنتی و با اقتباس از سایر روش‌های آزمون، دو یا سه آزمون که بیانگر نفوذپذیری یک نمونه باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این صورت، تغییرات قابل قبول نتیجه آزمون بین آزمون‌ها نیز مشخص نیست. از اینرو لازم است مطالعات بیشتری در خصوص شرایط آماده‌سازی آزمون‌ها و تغییرات بین نتایج آزمون‌های یک نمونه صورت پذیرد.

۳- طرح‌های مخلوط، نتایج و بحث

برای ارزیابی اثر طرح مخلوط بتن روی نفوذپذیری بتن، سه دسته آزمایش به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت:

- ۱- ساخت مخلوط‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه و ارزیابی نتایج نفوذپذیری آنها
- ۲- ساخت مخلوط بتن در مجموعه بتن‌ساز مرکزی کارگاه و ارزیابی نتایج نفوذپذیری آنها

آزمایش باید موقعی آغاز شود که حداقل ۲۸ روز از ساخت بتن گذشته باشد. همچنین فشار آب نباید روی سطح ماله‌کشی شده آزمون، اعمال شود. برای آزمایش، آزمون درون دستگاه قرار داده می‌شود و فشار آب ($50.0 \pm 5.0 kPa$) برای مدت 72 ± 2 ساعت روی سطح مورد آزمایش اعمال می‌گردد. در طول آزمایش، بصورت دوره‌ای، سطوحی از آزمون که در معرض فشار آب قرار داده نشده است بررسی می‌شود و اگر نشتی مشاهده شد، گزارش می‌شود.

بعد از اینکه فشار در مدت مشخص شده بکار گرفته شد، آزمون از دستگاه خارج شده و سطحی از آزمون که در معرض فشار بود خشک می‌شود تا آب اضافی آن خارج گردد. آزمون، عمود بر سطحی که در معرض فشار آب بود، به دو نیم می‌شود. به محض اینکه سطح دو نیم‌شده آزمون به اندازه‌ای خشک شد که پیشروی آب بطور واضح قابل مشاهده بود، پیشروی آب در آزمون علامت‌گذاری می‌گردد (شکل ۵). حداکثر عمق نفوذ آب تحت شرایط آزمایش، اندازه‌گیری شده و با دقت ۱ میلی‌متر ثبت می‌شود. در نهایت حداکثر عمق نفوذ آب که با دقت ۱ میلی‌متر بیان می‌شود، نتیجه آزمایش می‌باشد.



شکل ۵- علامت‌گذاری مسیر نفوذ (پیشروی) آب در بتن پس از اتمام آزمایش

نرمی ماسه دسته اول، ۲/۸ و دسته دوم، ۳/۱ بوده است. از طرفی فوق روان کننده مصرفی در هر سه دسته متفاوت بوده و از کارخانه های متفاوت تهیه شده است.

طرح مخلوط بتن برای دسته های اول (شامل ۷ طرح مخلوط)، دوم (شامل ۷ طرح مخلوط) و سوم (شامل یک طرح مخلوط) در جداول ۲ تا ۴ ذکر شده است.

۳- تکرار یک طرح مخلوط مشخص در یک کارگاه در دوره زمانی طولانی و ارزیابی نتایج نفوذپذیری آنها

۳-۱- مواد و مصالح و طرح مخلوط

برای ساخت طرح مخلوط بتن در دسته های مختلف، از مصالح با مشخصات جدول ۱ استفاده شد. ضمناً برای جلوگیری از طولانی شدن متن مقاله، جزییات مصالح مورد استفاده ذکر نشده است. البته لازم به ذکر است جدول

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی

مشخصات مصالح دسته اول				
ریزدانه	درشت دانه	سیمان	آب	افزودنی شیمیایی
ماسه طبیعی منطقه شهریار (۰-۴/۷۵mm)	شن شکسته منطقه شهریار (۹/۵-۱۹mm)	نوع ۲ سازه	شرب شهر تهران	فوق روان کننده پایه پلی کربکسیلات اتر
مشخصات مصالح دسته دوم و سوم				
ریزدانه	درشت دانه	سیمان	آب	افزودنی شیمیایی
ماسه طبیعی منطقه پاکدشت (۰-۴/۷۵mm)	شن طبیعی منطقه پاکدشت (۴/۷۵-۱۹mm)	نوع ۲ فراز فیروزکوه	کارگاه منطقه شریف آباد	فوق روان کننده پایه پلی کربکسیلات اتر

جدول ۲- طرح مخلوط بتن - دسته اول

شماره طرح مخلوط	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7
عیار سیمان (kg/m^3)	۴۲۳	۴۰۲	۳۷۶	۳۵۳	۳۳۳	۳۱۵	۲۹۹
آب (kg/m^3)	۱۵۲	۱۶۱	۱۶۹	۱۷۷	۱۸۳	۱۸۹	۱۹۴
نسبت آب به سیمان (w/c)	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۵
ریزدانه (kg/m^3)	۱۱۴۸	۱۱۴۸	۱۱۴۸	۱۱۴۸	۱۱۴۸	۱۱۴۸	۱۱۴۸
درشت دانه (kg/m^3)	۶۱۸	۶۱۸	۶۱۸	۶۱۸	۶۱۸	۶۱۸	۶۱۸
درصد فوق روان کننده نسبت به وزن سیمان	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۱۰

جدول ۳- طرح مخلوط بتن - دسته دوم

شماره طرح مخلوط	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
عیار سیمان (kg/m^3)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
آب (kg/m^3)	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	۲۲۰	۲۴۰
نسبت آب به سیمان (w/c)	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۶۰
ریزدانه (kg/m^3)	۱۰۶۲	۱۰۳۴	۱۰۰۶	۹۷۷	۹۴۹	۹۲۰	۸۹۱
درشت‌دانه (kg/m^3)	۸۰۴	۷۸۳	۷۶۲	۷۴۰	۷۱۸	۶۹۷	۶۷۵
درصد فوق روان‌کننده نسبت به وزن سیمان	۲/۰	۱/۳	۰/۸۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۲۸	۰

جدول ۴- طرح مخلوط بتن - دسته سوم

شماره طرح مخلوط	T-1
عیار سیمان (kg/m^3)	۳۶۰
زئولیت (kg/m^3)	۴۰
آب (kg/m^3)	۱۶۰
نسبت آب به سیمان (w/c)	۰/۴۰
ریزدانه (kg/m^3)	۱۰۹۲
درشت‌دانه (kg/m^3)	۵۸۶
درصد فوق روان‌کننده نسبت به وزن سیمان	۰/۹
درصد حبابساز نسبت به وزن سیمان	۰/۰۶

۳-۲- نتایج و بحث

می‌توان به کاهش حجم خمیر و آب قابل تبخیر در اثر کاهش نسبت آب به سیمان در دسته دوم طرح‌های مخلوط نسبت داد (شکل ۶). همین روند برای آزمون جذب آب کل بتن برقرار است (شکل ۷). این نتایج در شرایط بدست آمده است که روانی طرح‌های دسته اول (به عنوان بتن با روانی عادی) و روانی طرح‌های دسته دوم (بتن خودتراکم) تفاوت قابل توجهی دارد. همچنین با توجه به عدم استفاده از افزودنی حبابساز، درصد هوای کلیه مخلوط‌های دسته اول و دوم در محدوده عادی قرار داشته‌اند.

نتایج آزمون‌های بتن تازه و سخت‌شده هر یک از طرح‌های مخلوط دسته اول و دسته دوم در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. همچنین نتایج برداشت شده از طرح مخلوط T-1 که در تاریخ‌های مختلف ساخته شده در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج جداول ۵ و ۶ و همانطوریکه پیش‌بینی می‌شد، با افزایش نسبت آب به سیمان (چه در حالت عیار ثابت و چه در حالت حجم خمیر ثابت)، مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ افزایش می‌یابد. هرچند این افزایش برای حالت عیار ثابت، بیشتر است که دلیل آن را

جدول ۵- نتایج آزمون‌های بتن تازه و سخت‌شده - دسته اول

شماره طرح مخلوط	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7
اسلامپ (mm) ^۱	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۷۰
درصد هوا (mm) ^۲	۳/۰	۲/۵	۲/۵	۲/۲	۲/۴	۲/۵	۲/۳
مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa) ^۳	۴۲/۸	۳۷/۷	۳۱/۴	۲۷/۹	۲۳/۸	۱۹/۷	۱۶/۵
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) ^۳	۵۶/۱	۴۸/۶	۴۲/۴	۳۹/۵	۳۴/۹	۲۹/۸	۲۴/۸
مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa) ^۳	۶۲/۸	۵۵/۶	۵۰/۶	۴۷/۵	۴۲/۹	۳۸/۵	۳۲/۸
جذب آب کل (%) ^۴	۵/۶۸	۶/۰۸	۶/۵۲	۷/۱۵	۷/۵۹	۸/۱۲	۸/۷۵
عمق نفوذ آب در بتن (mm) ^۵	۱۲	۱۶	۱۸	۱۹	۲۳	۲۵	۲۰

^۱ آزمون تعیین اسلامپ بتن تازه طبق استاندارد ASTM C143 [۴۴] انجام شده است.

^۲ آزمون تعیین درصد هوا بتن تازه طبق استاندارد ASTM C231 [۴۵] انجام شده است.

^۳ مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ mm و طبق استاندارد EN 12390-3 تعیین شده است.

^۴ جذب آب کل بتن طبق استاندارد ASTM C642 و روی مغزه‌های با قطر و ارتفاع ۷۵ mm در سن ۹۰ تعیین شده است.

^۵ عمق نفوذ آب در بتن طبق استاندارد EN 12390-8 و روی آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ mm در سن ۹۰ تعیین شده است.

جدول ۶- نتایج آزمون‌های بتن تازه و سخت‌شده^۱ - دسته دوم

شماره طرح مخلوط	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
اسلامپ (mm)	۵۴۰	۶۲۰	۶۵۰	۵۲۰	۳۹۰	۴۶۰	۵۹۰
درصد هوا (mm)	۳/۰	۰/۹	۱/۲	۱/۶	۱/۵	۱/۳	۰/۶
مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۶۲/۹	۵۶/۱	۴۹/۹	۳۸/۶	۳۶/۱	۳۴/۰	۲۵/۴
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۷۴/۶	۶۶/۴	۵۹/۷	۴۷/۴	۴۳/۶	۳۹/۶	۳۱/۵
مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa)	۸۱/۸	۷۳/۲	۶۴/۸	۵۳/۰	۴۶/۶	۴۱/۲	۳۳/۶
جذب آب کل (%)	۳/۹۸	۴/۵۰	۵/۲۳	۵/۹۲	۶/۵۹	۸/۰۱	۹/۷۲
عمق نفوذ آب در بتن (mm)	۷	۱۷	۱۶	۱۶	۱۱	۱۴	۱۳

^۱ آزمون‌های این جدول طبق روش‌های آزمون جدول ۵ انجام شده است.

جدول ۷- نتایج آزمون‌های بتن تازه و سخت‌شده ۱- طرح مخلوط T-1

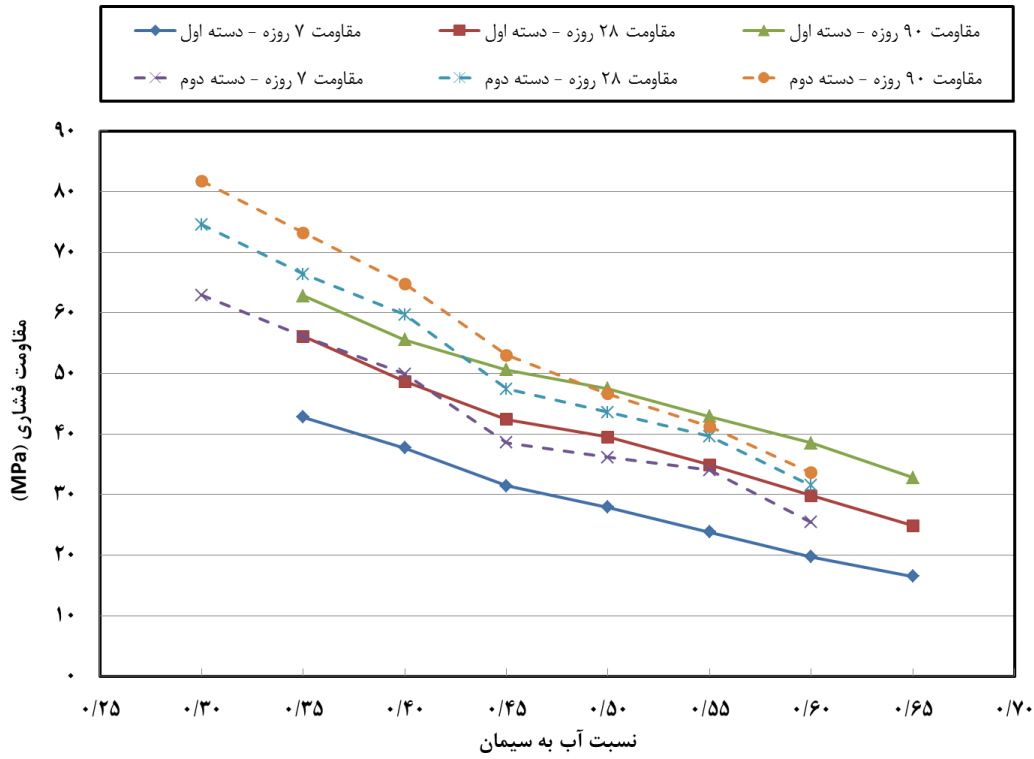
تاریخ ساخت نمونه											
۹۹/۱۲/۱۰	۹۹/۰۸/۲۷	۹۹/۰۳/۱۸	۹۸/۱۱/۱۹	۹۸/۰۹/۲۸	۹۸/۰۷/۱۳	۹۸/۰۲/۱۰	۹۷/۰۷/۰۱	۹۷/۰۲/۰۴	۹۶/۱۰/۱۸	۹۶/۰۷/۱۷	
۶۵۰	۶۴۰	۵۷۰	۶۷۰	۶۶۰	۵۸۰	۵۰۰	۶۰۰	۵۳۰	۶۴۰	۵۹۰	قطر پخش‌شدگی (mm) ^۲
۶/۸	۷/۲	۶/۸	۷/۲	۷/۰	۶/۳	۶/۸	۶/۵	۶/۵	۶/۲	۷/۰	درصد هوا (mm)
۳۳/۵	۳۶/۷	۳۳/۳	۳۲/۳	۳۲/۶	۳۳/۱	۲۶/۲	۳۱/۸	۳۳/۳	۳۳/۶	۳۵/۸	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)
۴۰/۳	۴۴/۰	۴۱/۰	۳۷/۴	۳۹/۶	۴۱/۹	۴۱/۴	۴۱/۳	۴۲/۶	۴۱/۲	۴۸/۳	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۱۰	۱۲	۱۵	۱۴	۱۵	۱۰	۱۳	۱۷	۱۷	۲۵	۱۲	عمق نفوذ آب (mm) - آزمون ۱
۱۴	۲۳	۱۱	۱۲	۹	۱۰	۱۸	۱۵	۱۱	۱۷	۱۲	عمق نفوذ آب (mm) - آزمون ۲
۲۵	۱۳	۱۴	۱۰	۱۷	۱۲	۱۰	۳۰	۱۸	۲۰	۲۰	عمق نفوذ آب (mm) - آزمون ۳
۱۶	۱۶	۱۳	۱۲	۱۴	۱۱	۱۴	۲۱	۱۵	۲۱	۱۵	میانگین عمق نفوذ آب در بتن (mm)
۵۳	۴۴	۱۸	۱۷	۳۴	۱۳	۳۲	۴۵	۲۸	۲۱	۳۶	نسبت حداکثر تغییرات به میانگین عمق نفوذ آب (%)

^۱ آزمون‌های این جدول طبق روش‌های آزمون جدول ۵ انجام شده است.

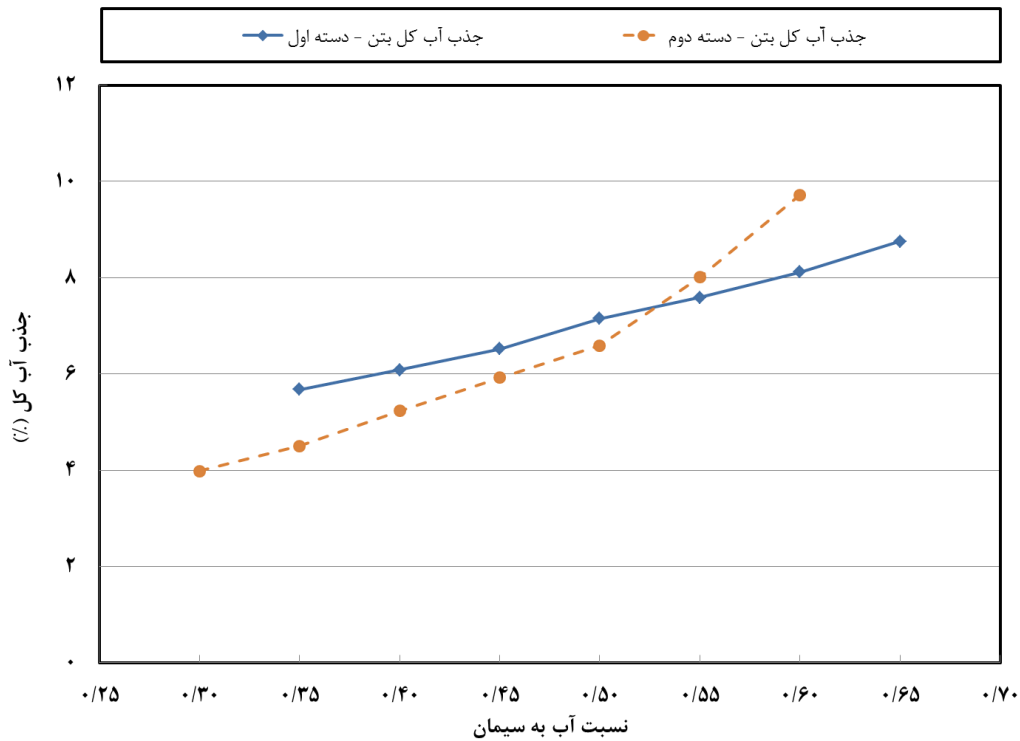
^۲ آزمون تعیین قطر پخش‌شدگی بتن تازه طبق استاندارد *ASTM C1611* [۴۶] انجام شده است.

دسته از طرح‌ها، عمق نفوذ آب در بتن از نسبت آب به سیمان ۰/۳۰ تا ۰/۴۵ افزایش داشته است و سپس با افزایش نسبت آب به سیمان تا ۰/۶۰، کاهش داشته است. بنابراین نمی‌توان به صراحت بیان کرد که با افزایش نسبت آب به سیمان، عمق نفوذ آب در بتن افزایش می‌یابد در صورتیکه طبق انتظار، با افزایش نسبت آب به سیمان حجم تخلل بتن افزایش یافته و قطر منافذ بتن زیادتر می‌شود، در نتیجه نفوذپذیری بتن نیز می‌بایست افزایش یابد.

نکته‌ای که در آزمون تعیین عمق نفوذ آب باید توجه نمود، عدم افزایش زیاد عمق نفوذ با افزایش نسبت آب به سیمان در طرح‌های دسته اول و دوم بوده است. همانطوریکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود، عمق نفوذ آب از در بتن از آب به سیمان ۰/۳۵ تا ۰/۶۰ افزایش داشته است و سپس با افزایش نسبت آب به سیمان تا ۰/۶۵، کاهش داشته است؛ تا آنجاییکه عمق نفوذ آب در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۶۵، به ۲۰mm کاهش یافته است. همین روند در طرح‌های مخلوط دسته دوم مشاهده شده است. در این



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری با نسبت آب به سیمان



شکل ۷- تغییرات میزان جذب آب کل بتن با نسبت آب به سیمان

تغییرات عمق نفوذ در بین آزمون‌های یک نمونه، زیاد باشد (شکل ۵).

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سه دسته مخلوط برای ارزیابی نفوذپذیری بتن، طراحی و ساخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که آزمون عمق نفوذ آب در بتن طبق استاندارد *EN 12390-8* به عنوان معیاری برای نفوذناپذیری/آب‌بندی بتن، دارای پراکنندگی زیادی بین آزمون‌های یک نمونه است. همچنین با تغییر ریزساختار بتن در اثر کاهش/افزایش نسبت آب به سیمان، نتیجه این آزمون از یک روند ثابت پیروی نمی‌کند. هرچند میزان عمق نفوذ آب در بتن‌های با نسبت آب به سیمان خیلی کم (کمتر از ۰/۴)، همیشه پایین بدست آمده است ولی برای بتن با نسبت آب به سیمان زیاد (بیشتر از ۰/۵) این آزمون نتیجه قابل قبولی از نفوذپذیری را بدست نمی‌دهد. بنابراین لازم است در انتخاب این روش آزمون برای تعیین میزان آب‌بندی بتن (به ویژه برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان بین ۰/۴۰ تا ۰/۵۰) دقت کافی صورت پذیرد.

۵- تقدیر و تشکر

از همکاران آزمایشگاه فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به ویژه آقایان مهندس سیدعلی میرباقری شاد و مهرداد قادری برای همکاری در ساخت نمونه‌های بتن و انجام آزمایش‌های این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از کارشناسان محترم شرکت شنزار برای همکاری در ساخت نمونه‌های مربوط به دسته دوم مخلوط‌های این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

در دسته سوم از آزمایش‌ها که یک طرح مخلوط در بازه زمانی بیش از ۳ سال با مصالحی از منبع یکسان ساخته شد، علیرغم نتایج تقریباً یکسان در آزمون مقاومت فشاری، نتایج متفاوتی در عمق نفوذ آب بدست آمد. کمترین عمق نفوذ، 9mm و بیشترین عمق نفوذ، 30mm بود. همچنین میانگین نتایج عمق نفوذ ۱۱ نمونه، 17mm بوده است. اگر بین سه آزمون از هر نمونه، نتیجه‌ای که بیشترین تغییرات را نسبت به میانگین نتیجه آن نمونه داشته است، حذف نماییم، میانگین عمق نفوذ ۱۱ نمونه، 15mm بدست می‌آید. بنابراین یکی از مشکلات این روش آزمون، تغییرات زیاد نتیجه بین آزمون‌های یک نمونه است، بطوریکه حداکثر تغییرات بین نتایج آزمون‌های یک نمونه با میانگین نتایج آزمون‌ها، از ۱۷ درصد تا ۵۳ درصد در جدول ۷ محاسبه شده است. علت این تغییرات زیاد را می‌توان به دلایل زیر نسبت داد:

۱- شرایط رطوبتی آزمایشگاه نقش قابل توجهی در میزان کاهش درصد اشباع منافذ یک آزمون دارد. در نتیجه قابلیت پیشروی آب، غیر از گرادیان فشار به مکش مویینه نیز مربوط خواهد بود. بنابراین افزایش قطر منافذ به دلیل افزایش نسبت آب به سیمان، باعث افزایش سرعت خشک شدن منافذ به دلیل خروج رطوبت^۱ و بالعکس باعث کاهش پیشروی مویینه می‌شود. از اینروست که عمق نفوذ در همه نسبت‌های آب به سیمان به صورت هم‌راستا تغییر نمی‌کند.

۲- چون در این روش آزمون، حداکثر عمق نفوذ اندازه‌گیری می‌شود، ممکن است لایه مرزی ضعیف دور یک درشت‌دانه نزدیک به سطح آزمون، باعث پیشروی بیش از اندازه آب در بتن شود. به همین دلیل ممکن است

¹ desorption

- [1] Basheer, P.A.M., Chidiact, S.E., Long A.E. (1996). "Predictive models for deterioration of concrete structures". *Construction and Building Materials*, Vol. 10(1), pp 27-37.
- [2] Meijers, S.J., Bijen, J.M., De Borst, R., Fraaij, A.L.A. (2001). "Computational modelling of chloride ion transport in reinforced concrete". *HERON*, 46 (3), ISSN 0046-7316.
- [3] Elahi, A., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S.V., Khan, Q.U.Z. (2010). "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials". *Construction and Building Materials*. Vol. 24, pp 292-299.
- [4] Zhang, M.H, Li, H. (2011). "Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement". *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp 608-616.
- [5] Mehta, P.K., Gjorv, O.E. (1982). "Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume". *Cement and Concrete Research*, Vol. 12(5), pp 587-595.
- [6] Rostam, S. (1993). "Service life design - The European approach". *Concrete International*, 2432.
- [7] Mehta, P.K. (1998). "Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry". In: *Proceedings of 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-178, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, pp 1-20.
- [8] Malhotra, V.M., Mehta, P.K. (1996). "Pozzolanic and cementitious materials". *Advances in concrete technology*, 1, Taylor and Francis, London.
- [9] Stanish, K.D., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. (2000). "Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review". *Department of Civil Engineering, University of Toronto Toronto, Ontario, Canada*.
- [10] Zhutovsky, S., Hooton, R.D. (2019). "Role of sample conditioning in water absorption tests", *Construction and Building Materials*, Vol. 215, pp 918-924.
- [11] ASTM C1585 (2013). "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes". *ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania*.
- [12] BS 1881: Part 208 (1996). "Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete". *London, UK*.
- [13] BS 1881: Part 122 (1983). "Method for determination of water absorption". *London, UK*.
- [14] BS 1881: Part 5 (1970). "Methods of testing hardened concrete for other than strength". *London, UK*.
- [15] EN 1015-18, (2002). "Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar".
- [16] UNE 83982 (2008). "Determination of the capillary suction in hardened concrete".
- [17] UNI 10859 (2000). "Determination of water absorption by capillarity".
- [18] ASTM C642 (2013). "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete". *West Conshohocken, Pennsylvania*.
- [19] ABNT NBR 9778 (2009). "Determination of water absorption, voids index, and specific mass".
- [20] Hooton, R.D. (1988). "What Is Needed In A Permeability Test For Evaluation Of Concrete Quality". *MRS Online Proc. Libr. Arch.* 137.

- [21] Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V. (1997). "Methods for the determination of water permeability of concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 94, pp 257–261.
- [22] Armaghani, J.M., Bloomquist, D.G. (1994). "Development of Concrete Durability Specification and Ratings in Florida", *Transportation Research Records*, files/593/view.html.
- [23] EN 12390-8 (2019). "Depth of penetration of water under pressure". *EUROPEAN STANDAR*, Published by BSI Standards
- [24] DIN 1048-5 (1991). "Testing of hardened concrete".
- [25] ABNT NBR 10787 (2011). "Determination of penetration of water under pressure".
- [26] NCH 2262 (2010). "Determination of the impermeability to water - method of penetration of water under pressure".
- [27] CRD-C 48-92 (1992). "Standard Test Method for Water Permeability of Concrete".
- [28] Concrete Institute of Australia, Durability Committee (2015). "Recommended Practice. Concrete Durability Series Z7/07- Performance Tests to Assess Concrete Durability".
- [29] Riding, K.A., Tibbetts, C.M., Ferraro, C.C. (2020). "Testing Methods to Assess the Durability of Concrete Permeability Reducing Admixtures". *The Florida Department of Transportation Research Center*.
- [۳۰] ضایعه ۱۲۰-۲ (۱۴۰۰). "آیین‌نامه بتن ایران (ویرایش دوم) - جلد دوم: مصالح و اجرا"، سازمان برنامه و بودجه کشور.
- [۳۱] مبحث نهم مقررات ملی ایران (۱۳۹۹). "طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه (ویرایش پنجم)"، وزارت راه و شهرسازی.
- [۳۲] رمضانیانپور، ع.، پورخورشیدی، ع. (۱۳۸۴). "آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [۳۳] نعمتی چاری، م.، سبجانی، ج.، پورخورشیدی، ع. (۱۳۹۸). "مشخصات حفاظ‌های بتنی راه و راهنمای کنترل کیفیت آنها". مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [۳۴] نعمتی چاری، م. (۱۴۰۰). "مشخصات افزودنی‌های آب‌بند و نم‌بند و راهنمای کنترل کیفیت آنها". مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [۳۵] نعمتی چاری، م.، سبجانی، ج.، پورخورشیدی، ع. (۱۴۰۰). "دستورالعمل مشخصات فنی و کنترل کیفی دوغاب دوده سیلیس آماده". مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [36] Kim J.K., Lee C.S. (1998). "Prediction of differential drying shrinkage in concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 28(7), pp 985–994.
- [37] Wanga L., Ueda T. (2011). "Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption". *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp 519–528.
- [38] Zhang M.H, Li H. (2011). "Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement". *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp 608–616.
- [39] Wang, Y., Li, L.Y., Page, C.L. (2005). "Modelling of chloride ingress into concrete from a saline environment". *Building and Environment*, Vol. 40, pp 1573–1582.

- [40] Neville A.M. (1996). "Properties of concrete (4th)". Wiley, New York.
- [41] Conciatori, D., Sadouki, H., Brühwiler, E. (2008). "Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 38(12), pp 1401-1408.
- [42] Hanzic L., Kosec L., Anzel I. (2010). "Capillary absorption in concrete and the Lucas–Washburn equation". *Cement and Concrete Composite*, Vol. 32, pp 84–91.
- [43] Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. (2004). "Corrosion of steel in concrete". WILEY-VCH Verlag.
- [44] Yokozeki K., Watanabe K., Hayashi D., Sakata N., Otsuki N. (2003). "Modeling of ion diffusion coefficients in concrete considering hydration and temperature effects". *Concrete Library International*, Vol. 42, pp 105–119.
- [45] Ishida T., Iqbal P.O., Anh H.T.L. (2009). "Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, pp 913-923.
- [46] ASTM C143 (2017). "Standard Test Method for Slump Of Portland Cement Concrete". West Conshohocken, Pennsylvania.
- [47] ASTM C231 (2014). "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method". West Conshohocken, Pennsylvania.
- [48] ASTM C1611/C1611 (2005). "Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete". West Conshohocken, Pennsylvania.

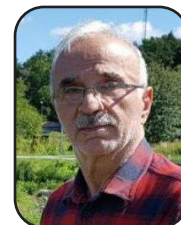
ارزیابی اثر الیاف های فولادی و شیشه ای بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی در محیط اسیدی



امید بامحبت
کارشناس ارشد سازه
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان



محمدرضا رئوفی
کارشناس ارشد سازه
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان



علی صدر ممتازی
دکترای سازه
استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان

چکیده

سیمان‌های ژئوپلیمری همانند سیمان‌های پرتلند برای بسیاری موارد قابل استفاده می باشند. مهمترین مورد مصرف سیمان ژئوپلیمری در ساخت بتن می باشد. با توجه به مصرف زیاد بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان پرتلند، توجه به اثرات محیطی این ماده ضروری است. این اثرات شامل ۷ درصد از انتشار گاز CO₂ در جو زمین و مصرف قابل توجه انرژی مانند برق و سوخت های فسیلی است. از این رو ارائه محصولات جایگزین به منظور حرکت به سمت توسعه پایدار ضروری می باشد. بعضی از مزایای تولید سیمان ژئوپلیمری صرفه جویی در انرژی، منابع، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای از کارخانه های تولید سیمان پرتلند از طریق بهبود بهره وری انرژی و رشد تولید است. سیمان های ژئوپلیمری نیاز به مصرف انرژی کمتری داشته و تولید آن سبب می شود انتشار گاز دی اکسید کربن نسبت به سیمان های معمولی در جو کاهش یابد. و همچنین بتن ژئوپلیمر در برابر محیط های اسیدی و خورنده عملکرد بسیار مطلوبی از خود به نمایش گذاشته است. در این تحقیق به بررسی عملکرد الیاف فولادی و شیشه در بتن ژئوپلیمری حاوی مواد ترکیبی پایه سرباره و دوده سیلیس در محیط اسیدی پرداخته شده است. در این مطالعه ۱۰ طرح مخلوط برای بتن ژئوپلیمر با الیاف ترکیبی فولادی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی و شیشه ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد حجمی و همچنین بدون الیاف بر پایه سرباره و ترکیبی از سرباره و دوده سیلیس تولید شده و نمونه های بتنی سخت شده در حوضچه اسیدی با pH=1 به مدت ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز قرار گرفتند. خواص مکانیکی بتن سخت شده از طریق اندازه گیری مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ روز و مقاومت کششی در سن ۲۸ روز اندازه گیری شده است. همچنین تاثیر محیط اسیدی بر مقاومت فشاری نمونه ها پس از ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده جایگزینی ۱۵ درصد از سرباره با دوده سیلیس موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی نمونه ها شده است. همچنین بالاترین مقدار برای مقاومت فشاری و کششی به موجب حضور ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف شیشه به همراه ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف فولادی به وقوع پیوسته است. از سوی دیگر جایگزینی دوده سیلیس موجب کاهش بیشتر مقاومت فشاری نمونه ها در قیاس با نمونه های حاوی سرباره پس از قرار گیری در حوضچه اسیدی شده است. کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خصوصیات مکانیکی، محیط اسیدی، الیاف فولادی، الیاف شیشه

امروزه نقش بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی، در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جوامع امری انکارناپذیر است. به ازای تولید هر تن سیمان یک تن کربن دی اکسید^۱ در جو آزاد می‌شود همچنین سالانه به ازای هر انسانی که بر روی زمین زندگی می‌کند حدود ۳ تن بتن تولید و مصرف می‌شود و استفاده از آن در سراسر جهان، پس از آب در رتبه دوم قرار می‌گیرد. همچنین تولید سیمان رتبه سوم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در اختیار دارد. [۱] با توجه به میزان مصرف بالای بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده، از جمله سهم حدود ۷ درصدی انتشار گاز دی اکسید کربن در جو [۲]، مصرف قابل ملاحظه انرژی از قبیل برق و سوخت فسیلی، امری اجتناب ناپذیر بوده و ارائه محصولات جایگزین جهت حرکت در مسیر توسعه پایدار، اصلی ضروری به شمار می‌آید. از این رو یکی از راهکارهای تولید بتنی سازگار با محیط زیست، کاهش مصرف سیمانهای پرتلند معمولی (OPC^۲) و استفاده از چسباننده‌های پوزولانی فعال شده می‌باشد. بنابراین ضروری است که برای کاهش مصرف سیمان از مواد جایگزین مناسب استفاده گردد.

اصطلاح ژئوپلیمر را اولین بار فردی به نام جوزف دیوید اویتس^۳ در سال ۱۹۷۹ مطرح کرد. [۳] او ژئوپلیمرها را به عنوان شاخه‌ای جدید از مواد آلومینا سیلیکاتی با ساختار سه بعدی معرفی کرد. به دنبال توسعه تکنولوژی ژئوپلیمرها، فرصت بسیار خوبی برای رشد و تولید محصولات گوناگون بر پایه ژئوپلیمرها فراهم گشت. [۴]

بتن ژئوپلیمر بتنی است متشکل از آلومینات^۴ و سیلیکات^۵، که در آن محلول قلیایی بعنوان فعال کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کنار نوع منبع آلومیناسیلیکاتی محلول فعال کننده قلیایی نیز به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی^۶ و $Al^{۷}$ ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول فعال کننده قلیایی استفاده شده در ژئوپلیمرها، ترکیبی از محلول سدیم هیدروکسید^۸ یا پتاسیم هیدروکسید^۹ با محلول سیلیکات سدیم^{۱۰} یا سیلیکات پتاسیم^{۱۱} است. [۵] از مزایای بتن ژئوپلیمری در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی می‌توان ضد حریق بودن، سازگاری با محیط زیست انرژی تولید پایین و همچنین خواص مکانیکی مطلوب و دوام بالا در محیط‌های خورنده را برشمرد.

ژئوپلیمرها از خانواده پلیمرهای معدنی می‌باشند، ترکیب شیمیایی آنها شبیه مواد ژئولیتی بوده اما ساختار میکروسکوپی آنها بجای کریستالی، آمورف می‌باشد. تولید ژئوپلیمرها بعنوان مواد چسبنده در بتن منجر به تولید بتن ژئوپلیمری شده است که به عنوان یک راه کار علمی و عملی می‌تواند جایگزینی مناسب برای بتن با سیمانهای پرتلند معمولی باشد.

^۴ AlO_2 ^۵ SiO_4 ^۶ Silicon^۷ Aluminium^۸ NaOH^۹ KOH^{۱۰} Na_2SiO_3 ^{۱۱} K_2SiO_4 ^۱ Carbon dioxide^۲ Ordinary Portland Cement^۳ Joseph Davidovits

مؤثر برای کاهش ترک خوردگی و نیز افزایش مقاومت کششی بتن است. هدف این مقاله بررسی نقش و مقدار الیاف فولادی و شیشه‌ای در بهبود مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری پس از قرار گیری در معرض محیط اسیدی می‌باشد. همچنین این پژوهش به بررسی تاثیر حضور دوده سیلیس در بتن ژئوپلیمری پس از قرار گیری در محیط اسیدی می‌پردازد. مقدار الیاف شیشه و فولادی مصرفی در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری به عنوان متغیرهای اصلی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. مقدار و نوع ماده پایه و همچنین غلظت ماده فعالساز برای تمامی آزمون‌ها مقدار ثابتی در نظر گرفته خواهد شود و دوده سیلیس به عنوان جایگزین بخشی از ماده پایه در طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری استفاده می‌شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مواد و مصالح

۲-۱-۱ چسباننده

سربراه استفاده شده در این تحقیقات از شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. ترکیب شیمیایی سربراه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سربراه آهن

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ترکیبات
37.4	27.6	7.4	20.5	2.8	0.5	0.8	3	درصد جرمی (%)

۲-۱-۲ دوده سیلیسی

دوده سیلیسی استفاده شده در این تحقیقات از شرکت ازنا و سمنان تهیه شده است. ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی

SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	SiC ^{۱۲}	C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ترکیبات
0.10	0.16	1.01	0.31	0.08	0.5	0.3	96.4	0.91	1.32	0.49	0.97	درصد جرمی (%)

با توجه به مشخصات توضیح داده شده در مورد بتن ژئوپلیمری، از این نوع بتن می‌توان در ساخت تراورس های راه آهن، لوله های فاضلاب و اعضای پیش تنیده استفاده کرد. اخیراً از بتن ژئوپلیمری در تولید کالورت های پیش ساخته استفاده شده که آزمایش ها انجام شده بر روی آن حاکی از عملکرد مثبت بتن ژئوپلیمری به عنوان کالورت می باشد. همچنین بتن های ژئوپلیمری مقاومت بالایی در برابر حملات شیمیایی از خود نشان می دهند. این قابلیت است که در محیط هایی با دی اکسید کربن بالا و خاک های سولفاتی می تواند بکارگرفته شود. آزمایش های شبیه سازی شده شرایط مهاجم فاضلاب که بر روی لوله های بتن ژئوپلیمری صورت گرفته، حکایت از داشتن مزیت رقابتی بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن های معمولی دارد. [۶]

تاکنون در زمینه اثر الیاف شیشه ای و فولادی بر دوام بتن ژئوپلیمری تحقیقات گسترده ای صورت نگرفته است. شاید یکی از مهم ترین دلایل بحث هزینه اقتصادی این نوع الیاف می باشد. استفاده از الیاف در ساخت بتن، یکی از روش های

^{۱۲} Silicon carbide

۳-۱-۲ محلول قلیایی - سیلیکاتی

مایع با وزن مخصوص ۱/۵۲ گرم بر میلی لیتر می باشد. همچنین اطلاعات شیمیایی این محلول در جدول ۳ قابل مشاهده است.

سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید مورد استفاده در این مطالعه از شرکت دیجی شیمی تهیه شده است. درصد خلوص سدیم هیدروکسید مورد استفاده ۵۰٪ و از نوع

جدول ۳- ترکیب شیمیایی سدیم هیدروکسید مورد استفاده در این پژوهش

ترکیبات	SO ₄ ²⁻	Mg	SiO ₂	Fe ²⁺	NaCl	NaOH
واحد	0.5	2.8	Ppm	Ppm	Ppm	---
سودمایع(٪)	0	0	5 - 7.5	0.5 - 0.8	20 - 35	48-50 %

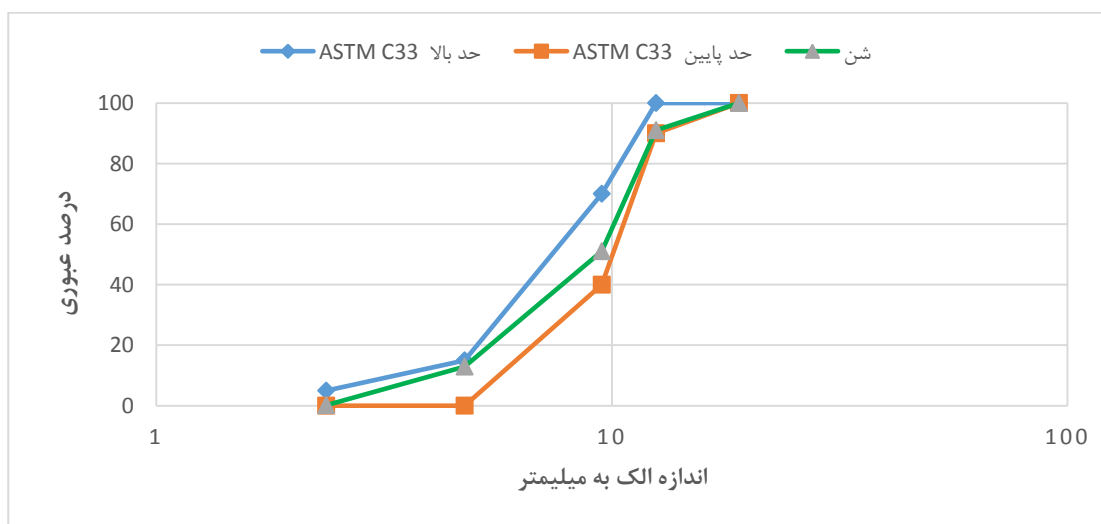
۴-۱-۲ آب مصرفی

۵-۱-۲ سنگدانه

آبی که برای ساخت بتن استفاده می شود باید تمیز و عاری از مواد زیان آور نظیر روغن ها، اسیدها، بازها، نمک ها و مواد آلی و قندی باشد. به طور کلی مصرف آب آشامیدنی برای ساخت و عمل آوری بتن مناسب است. وجود مقدار بالای یون کلرید و سولفات در آب باعث از بین رفتن پوشش بتنی، خوردگی و زنگ زدگی و افزایش حجم میلگردها و در نتیجه ترک خوردن و ریزش پوشش می گردد. در این تحقیقات از آب شرب شهرستان رشت جهت ساخت بتن استفاده گردید.

۱-۵-۱-۲ درشت دانه

در این تحقیق شن شکسته مصرفی مخلوط رودخانه ای بوده و از کارخانه لوله سازی شمال رشت که اغلب از رودخانه سفید رود تامین می شود تهیه گردیده است. حداکثر اندازه دانه های شن مورد استفاده ۱۹ میلیمتر بوده و همچنین دارای وزن مخصوص ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. مطابقت دانه بندی شن مصرفی با محدوده مورد پذیرش استاندارد ASTM C33 در شکل ۱ قابل مشاهده است.

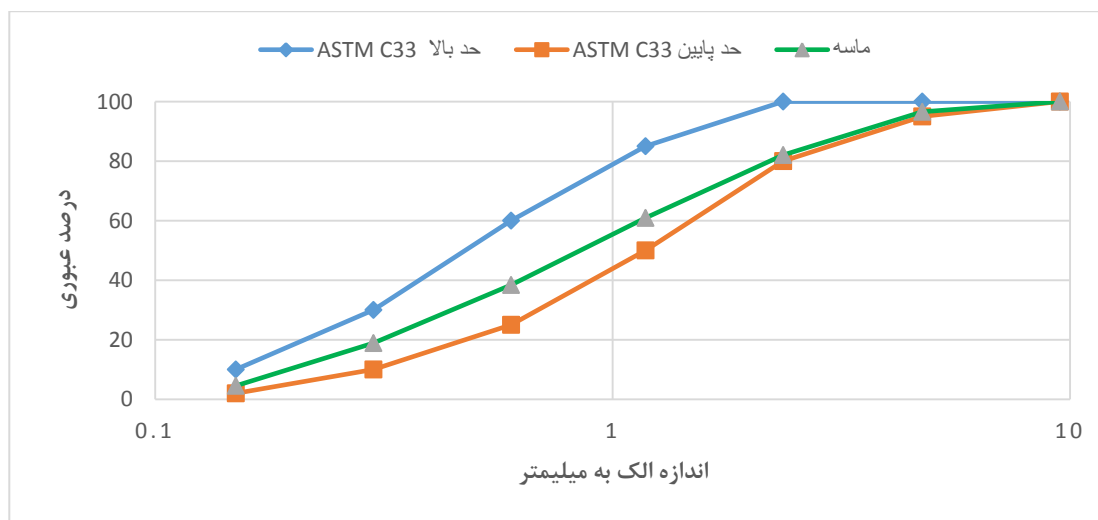


شکل ۱- منحنی دانه بندی شن مصرفی براساس استاندارد ASTM

۲-۵-۱-۲ ریز دانه

ماسه به عنوان مصالح سنگی ریزدانه در مخلوط بتن استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت ساخت بتن ژئوپلیمری از ماسه رودخانه ای و گردگوشه استفاده شده است این ماسه تحت عنوان ماسه ۶-۰ نیز شناخته می‌شود چگالی ماسه مصرفی در حالت اشباع با سطح خشک برابر

با ۲۶۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، جذب آب آن ۲/۴ درصد بوده است. ماسه مصرفی از کارخانه لوله سازی شمال تهیه شده است. دانه بندی ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C33 می‌باشد. مطابقت دانه بندی ماسه مصرفی با محدوده مورد پذیرش استاندارد ASTM C33 در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- منحنی دانه بندی ماسه مصرفی براساس استاندارد ASTM

۲-۲ اختلاط مواد و ساخت بتن

برای دستیابی به اهداف این پژوهش در مجموع ۱۰ طرح مختلف از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره و سرباره بعلاوه درصدی دوده سیلیس ساخته شده است. در تمامی طرح ها نسبت محلول فعالساز به مواد چسباننده ثابت و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر میزان عیار بتن در تمامی طرح ها ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. در این پژوهش از درصد های مختلف الیاف به منظور بررسی عملکرد بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف تحت آزمایش های مختلف استفاده شده است. ۲ طرح از ۱۰ طرح بعنوان طرح های شاهد بدون الیاف به

منظور مقایسه نمونه ها در نظر گرفته شد است. به منظور بررسی حضور الیاف در بتن ژئوپلیمری تاثیر حضور توأمان الیاف فولاد و شیشه مورد بررسی قرار گرفت. الیاف فولاد با دو درصد حجمی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد و همچنین الیاف شیشه با دو درصد حجمی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۰ مولار در ساخت نمونه ها استفاده شد. الیاف فولادی و شیشه ای استفاده شده در این پژوهش به ترتیب دارای وزن مخصوص ۷۸۵۰ و ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. جزئیات مربوط به هر طرح اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- طرح مخلوط

کیلوگرم بر مترمکعب									نام طرح
الیاف فولاد	الیاف شیشه	شن	ماسه	سدیم هیدروکسید	سدیم سیلیکات	دوده سیلیس	سرباره	عیار	
۰	۰	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۰	۳۵۰	۳۵۰	S-Ctrl
۳۹,۳	۶,۷	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۰	۳۵۰	۳۵۰	S-G0.25-S0.5
۳۹,۳	۱۳,۴	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۰	۳۵۰	۳۵۰	S-G0.5-S0.5
۵۸,۹	۶,۷	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۰	۳۵۰	۳۵۰	S-G0.25-S0.75
۵۸,۹	۱۳,۴	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۰	۳۵۰	۳۵۰	S-G0.5-S0.75
۰	۰	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۵۲,۵	۲۹۷,۵	۳۵۰	SF15- Ctrl
۳۹,۳	۶,۷	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۵۲,۵	۲۹۷,۵	۳۵۰	SF15-G0.25-S0.5
۳۹,۳	۱۳,۴	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۵۲,۵	۲۹۷,۵	۳۵۰	SF15-G0.5-S0.5
۵۸,۹	۶,۷	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۵۲,۵	۲۹۷,۵	۳۵۰	SF15-G0.25-S0.75
۵۸,۹	۱۳,۴	۸۵۴	۱۱۵۲	۵۰	۱۲۵	۵۲,۵	۲۹۷,۵	۳۵۰	SF15-G0.5-S0.75

۱-۲-۲ مراحل ساخت بتن

درون قالب های ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متری ریخته شد و

بخوبی با کمک لرزاننده و میله متراکم شد تا هوای درون بتن خارج و سطح خارجی آن یکدست شود.

۲-۲-۲ شرایط عمل آوری

قالب ها بعد از ۲۴ ساعت باز شده و نمونه ها پس از گیرش ابتدایی به منظور عمل آوری به حوضچه آب با دمای 24 ± 2 منتقل شدند و تا سن مورد نظر داخل حوضچه نگهداری شدند.

به منظور ساخت تمامی طرح ها در ابتدا وزن کشتی تمامی اجزا مورد نیاز بتن اعم از مصالح سنگی ، پایه مدنظر ، فعال ساز و الیاف به مقدار لازم طبق طرح اختلاط ها انجام پذیرفت. سپس شن و ماسه و سرباره درون میکسر ریخته شده و اختلاط اولیه مواد خشک به مدت ۳ دقیقه انجام شد. پس از آن در طرح هایی که حاوی الیاف بودند الیاف مدنظر به آرامی به ترکیب موجود در میکسر اضافه شد. سپس بخش مخلوط محلول فعالساز که پیش از این آماده شده بود به آرامی به درون میکسر اضافه شد تا مخلوط نهایی حاصل گردد. اختلاط نهایی به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت تا تمامی مواد به خوبی مخلوط شوند و بتن تازه ژئوپلیمری جهت قالب گیری آماده شود. بتن ساخته شده،

۳-۲ آزمایش های انجام شده

۱-۳-۲ آزمایش تعیین مقاومت فشاری

تنش فشاری مکعبی حاصل بر اساس رابطه ۱ با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع آزمون بدست می آید.

$$f = \frac{P}{A} \quad (1)$$

که در آن f ، مقاومت فشاری بر حسب (MPa)؛ P ، نیروی حداکثر فشاری بر حسب (N)؛ A ، سطح مقطع بتن بر حسب (mm²) می باشد.

۲-۳-۲ آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دو نیم شدن

مقاومت کششی از رابطه ۲ محاسبه می شود.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (2)$$

که در آن T ، مقاومت کششی بر حسب (MPa)؛ P ، نیروی حداکثر فشاری بر حسب (N)؛ L ، طول آزمون بر حسب (mm) و D ، قطر آزمون بر حسب (mm) می باشد.

۳- نتایج آزمایش ها و تحلیل داده ها

۱-۳ مقاومت فشاری

با توجه به نمودار شکل ۳ مقدار مقاومت فشاری آزمون شاهد S-Ctrl در سن ۳ روز برابر با ۳۸ مگاپاسکال اندازه گیری شد. همچنین مقادیر فشاری آزمون ها پس از جایگزینی ۱۵ درصد از سرباره توسط دوده سیلیس در طرح SF15 در سن ۳ روز ۳۱/۷۵ مگاپاسکال بدست آمد که این مقادیر ۱۶،۴٪ کاهش نسبت به طرح شاهد را نشان می دهد. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح ها در سن ۳ روز مربوط به طرح S-G0.25-S0.75 (طرح با ۱۰۰٪ سرباره ، ۰/۲۵٪

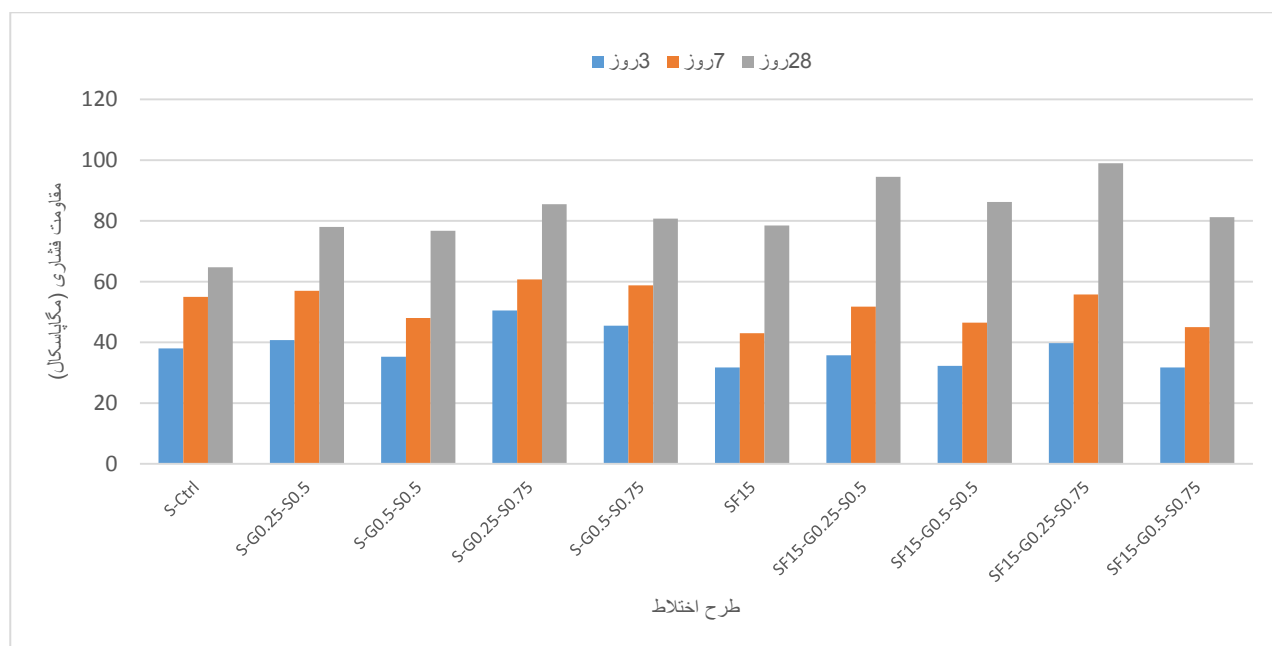
الیاف شیشه ، ۰/۷۵٪ الیاف فولادی) با مقدار ۵۰/۵ مگاپاسکال بوده که این مقدار ۳۲،۹٪ افزایش در قیاس با آزمون شاهد SF15 را نشان می دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر آن است که افزودن ۰/۷۵٪ الیاف فولاد به همراه ۰/۲۵٪ الیاف شیشه موجب افزایش قطعی مقاومت فشاری آزمون ها در قیاس با آزمون های شاهد (SF15,S-Ctrl) در سن ۳ روز شده است.

در سن ۷ روز آزمون های شاهد S-Ctrl و SF15 به ترتیب مقاومت فشاری ۵۵ و ۴۳ مگاپاسکال را از خود نشان دادند که به ترتیب نمایانگر ۴۴،۷٪ و ۳۵،۴٪ افزایش در مقاومت فشاری این طرح ها به نسبت سن ۳ روز همان طرح بود از سوی دیگر طرح SF15 به نسبت طرح S-Ctrl به ترتیب ۲۱،۸٪ کاهش در مقاومت فشاری از خود نشان داد. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح ها در سن ۷ روز به مانند سن ۳ روز مربوط به طرح S-G0.25-S0.75 با مقدار ۶۰/۷۵ مگاپاسکال بوده که این مقدار ۱۰/۵٪ افزایش در قیاس با آزمون شاهد SF15 را در سن ۷ روز نشان می دهد.

بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۳ در سن ۲۸ روز آزمون های شاهد S-Ctrl و SF15 به ترتیب مقاومت فشاری ۶۴/۷۵ و ۷۸/۵ مگاپاسکال را از خود نشان دادند که به ترتیب نمایانگر ۱۷،۷٪ و ۸۲،۵٪ افزایش در مقاومت فشاری این طرح ها به نسبت سن ۷ روز بود از سوی دیگر طرح SF15 به نسبت طرح S-Ctrl ۲۱،۲٪ افزایش در مقاومت فشاری از خود نشان داد. نکته حائز توجه این است که اگرچه

روز مربوط به طرح SF15-G0.25-S0.75 (طرح با ۰.۸۵٪ سرباره و ۰.۱۵٪ دوده سیلیس، ۰.۲۵٪ الیاف شیشه، ۰.۷۵٪ الیاف فولادی) با مقدار ۹۹ مگاپاسکال می باشد که ۲۶،۱٪ افزایش در قیاس با نمونه شاهد SF15 در سن ۲۸ روز را نشان می دهد. همچنین کمترین مقدار مقاومت فشاری در بین تمامی نمونه ها در سن ۲۸ روز مربوط به طرح S-Ctrl با مقدار ۶۴/۷۵ مگاپاسکال می باشد که این مقدار ۱۷،۵٪ کاهش در قیاس با نمونه شاهد SF15 را نشان می دهد.

جایگزینی ۱۵ درصدی دوده سیلیس بجای سرباره در کوتاه مدت موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه ها شده است اما این جایگزینی نهایتاً در سن ۲۸ روز موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه های شاهد فاقد الیاف SF15 شده است. همچنین نمونه های الیافی در طرح های حاوی دوده سیلیس در قیاس با نمونه های ساخته شده با ۰.۱۰٪ سرباره نیز از همین الگو پیروی کرده اند. از سوی دیگر نتایج نشان می دهد که بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح ها در سن ۲۸ روز بر خلاف سنین ۳ و ۷



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه ها مختلف در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز

افزایش زمان قرارگیری نمونه ها در حوضچه اسیدی میزان خوردگی و همچنین درصد تخریب سطوح آنها افزایش پیدا کرده است.

۲-۳ تغییرات محیط اسیدی

۱-۲-۳ تغییرات شکل ظاهری

شکل ظاهری نمونه ها در تصویر شکل ۴ آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص می باشد با

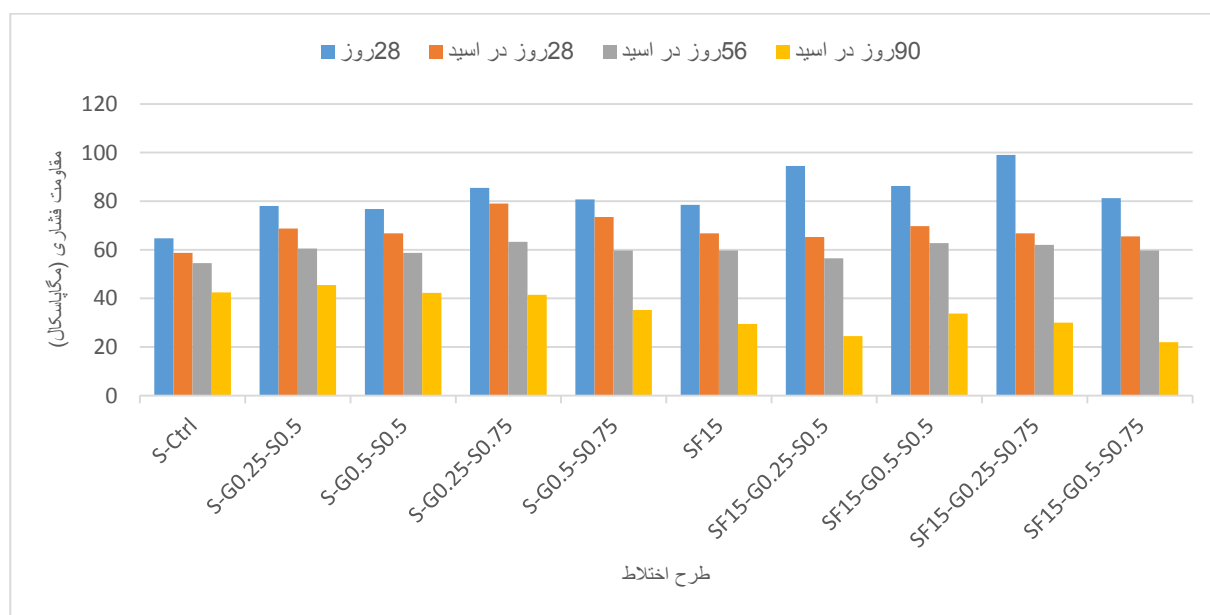


شکل ۴- شکلی ظاهری آزمون‌های ژئوپلیمری پس از خارج شدن از حوضچه اسیدی (۱- پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب ۲- پس از ۲۸ روز قرار گیری در حوضچه اسید ۳- پس از ۵۶ روز قرار گیری در حوضچه اسید ۴- پس از ۹۰ روز قرار گیری در حوضچه اسید)

۲-۲-۳ تغییرات مقاومت فشاری

اسیدی نشان داده شده است. با توجه به داده های بدست آمده پس از ۹۰ روز آزمون‌ها با کاهش قابل توجه مقاومت فشاری مواجه شدند هرچند این کاهش در آزمون‌های حاوی دوده سیلیس بیشتر بوده است.

تغییر در مقاومت فشاری آزمون‌ها به کمک اندازه گیری مقاومت فشاری آن‌ها بعد از ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز از قرار دادن آزمون‌ها در محلول اسیدی به دست آمد. در شکل ۵ تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌ها پس از قرار گیری در معرض حوضچه

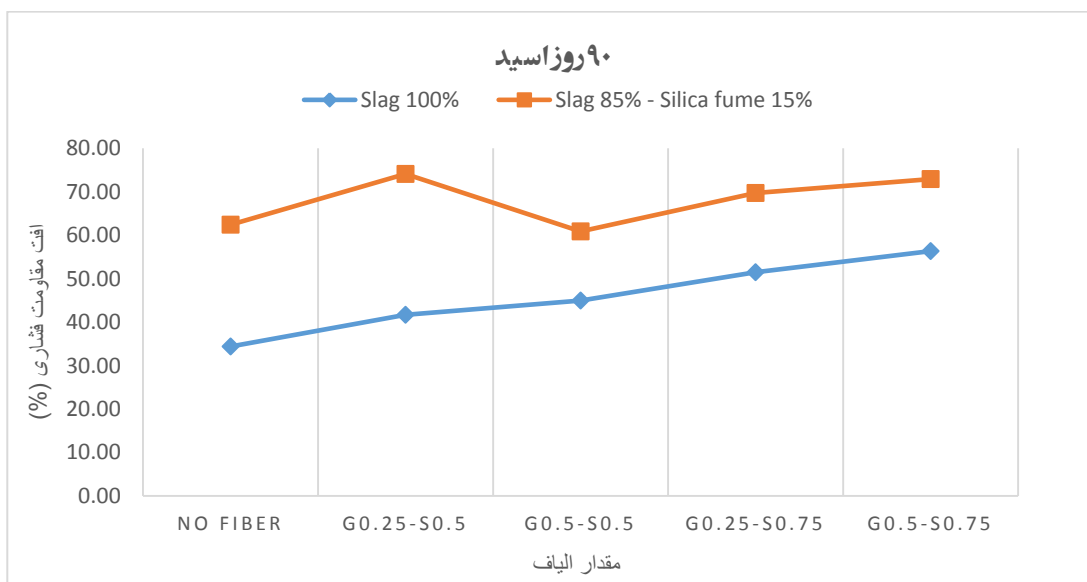


شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری طرح ها بر حسب مقدار الیاف و پایه بتن ژئوپلیمری پس از قرار گیری در حوضچه اسیدی در سنین مختلف

می گیرد، ژل C-S-H توسط اسیدها مورد حمله قرار می گیرد از سوی دیگر الیاف موجود در آزمون های حاوی الیاف به انتقال مواد اسیدی به درون آزمون ها کمک مضاعف کرده و این خود موجب تشدید تخریب بافت بتن می شود که در نهایت موجب کاهش مقاومت آن ها می گردد. با توجه به مطالب بیان شده و نتایج حاصل از آزمایش ها مشاهده می شود که در اغلب طرح ها با افزایش حجم الیاف موجود در آزمون ها میزان افت مقاومت فشاری نیز افزایش می یابد.

اطلاعات بدست آمده از نمودار شکل ۶ نمایانگر آن است که بیشترین مقدار افت مقاومت فشاری در طرح SF15-G0.25-S0.5 به میزان ۷۴٫۰۷٪ رخ داده است. همچنین طرح S-Ctrl با ۳۴٫۳۶٪ افت کمترین میزان افت مقاومت فشاری در برابر حمله سولفاتی را از خود نشان داد. با توجه به داده های موجود در نمودار مذکور افزودن دوده سیلیس موجب افزایش افت مقاومت فشاری در آزمون های فاقد الیاف شده است.

هنگامی که بتن ژئوپلیمری حاوی دوده سیلیسی در معرض اسید خورنده ای مانند اسید سولفوریک قرار

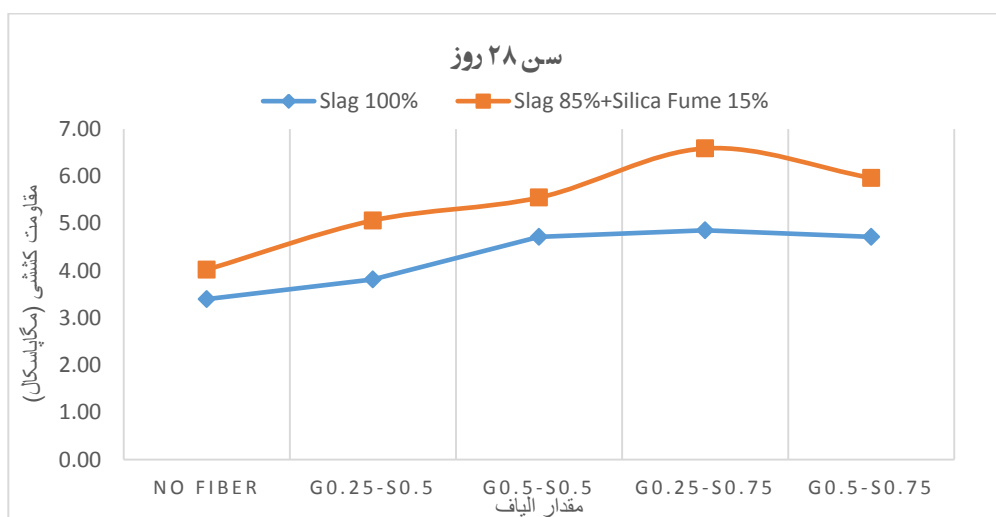


شکل ۶- مقایسه مقدار درصد افت مقاومت فشاری طرح‌ها بر حسب مقدار الیاف و پایه بتن ژئوپلیمری پس ۹۰ روز قرار گیری در حوضچه اسیدی

با ۴,۰۲ مگاپاسکال بدست آمد. از سوی دیگر با بررسی مقاومت کششی در بین تمامی طرح‌ها مشاهده شد که نمونه طرح SF15-G0.25-S0.75 (طرح با ۰/۲۵٪ الیاف شیشه، ۰/۷۵٪ الیاف فولادی) با ۶/۵۹ مگاپاسکال دارای بیشترین مقدار مقاومت کششی و کمترین مقدار مقاومت کششی می باشند.

۳-۳ مقاومت کششی

با توجه به نمودار رسم شده در شکل ۷ در این آزمایش مقدار مقاومت کششی نمونه شاهد S-Ctrl ۳,۴ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین با مقایسه مقاومت کششی نمونه شاهد S-Ctrl با نمونه ی شاهد فاقد الیاف SF15 مشخص شد که مقاومت کششی همانند مقاومت فشاری با جایگزینی دوده سیلیس در این طرح با افزایش همراه بوده است همچنین مقاومت کششی این طرح به ترتیب برابر



شکل ۷- مقایسه مقاومت کششی طرح‌ها بر اساس مقدار الیاف و پایه بتن ژئوپلیمری

۴- نتیجه گیری

به طور کلی با بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌های مختلف که در بخش‌های قبل قابل مشاهده می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که حضور الیاف در تعداد بالایی از طرح‌ها موجب افزایش مقاومت فشاری شده است و مقدار بهینه الیاف ترکیبی مورد استفاده در طرح‌ها مقدار ۰,۲۵٪ الیاف شیشه بعلاوه ۰,۷۵٪ الیاف فولادی می‌باشد. همچنین جایگزینی ۱۵ درصدی دوده سیلیس باعث بهبود مقاومت فشاری آزمون‌های الیافی و غیرالیافی حاوی دوده سیلیس در قیاس با آزمون‌های تماماً سرباره‌ای در سن ۲۸ روز شده است. همچنین جایگزینی دوده سیلیس با سرباره موجب افزایش سرعت تخریب بتن و در نتیجه افت بیشتر

مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی دوده سیلیس در مقایسه با آزمون‌های حاوی تنها سرباره شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، قابل مشاهده است که درصد حجمی الیاف رابطه مستقیمی با افزایش افت مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی سرباره دارد که علت آن را می‌توان تسهیل انتقال محلول سولفاتی به وسیله الیاف به درون آزمون‌ها دانست. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش کشش غیر مستقیم می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت کششی تمامی طرح‌ها نسبت به طرح‌های شاهد S-Ctrl و SF15- Ctrl شده است. همچنین مقدار بهینه الیاف ترکیبی مورد استفاده در طرح‌ها مقدار ۰,۲۵٪ الیاف شیشه بعلاوه ۰,۷۵٪ الیاف فولادی می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. (2019). "Use of geopolymers for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure Journal of Cleaner Production". *Construction and Building Materials*, Vol. 188, pp 1025-1034
- [2] Mohseni, E., Jafar Kazemi, M., Koushkbaghi, M., Zehtab, B, Behforouz, B. (2019). "Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nanoalumina". *Construction and Building Materials*, Vol. 209, pp 532-540
- [3] Davidovits, J. SPE PATEC '79, Society of Plastic Engineering, Brookfield Center, USA; 1979
- [4] Cioffi, R., Maffucci, L., Santoro, L. (2003). "Optimization of Geopolymer Synthesis by Calcination and Polycondensation of a Kaolinitic Residue". *Journal Resource, Conservation and Recycling*, Vol. 40, pp 27-38
- [5] Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D., Rangan, B. (2004). "On the Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 101(6), pp 467-472.
- [6] Lloyd, N., Rangan, B. (2010). "Geopolymer Concrete with Fly Ash", *Second international conference on Sustainable construction materials and technologies*.